



Inventario de Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes Criterio para Santiago de Cali



Centro Internacional de Agricultura Tropical
Desde 1967 *Ciencia para cultivar el cambio*



ALCALDÍA DE
SANTIAGO DE CALI



Corporación Autónoma
Regional del Valle del Cauca

CIAT

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) —miembro del Consorcio CGIAR— desarrolla tecnologías, métodos innovadores y nuevos conocimientos que contribuyen a que los agricultores, en especial los de escasos recursos, logren una agricultura eco-eficiente —es decir, competitiva y rentable así como sostenible y resiliente. Con su sede principal cerca de Cali, Colombia, el CIAT realiza investigación orientada al desarrollo en las regiones tropicales de América Latina, África y Asia.

www.ciat.cgiar.org

CGIAR es una alianza mundial de investigación para un futuro sin hambre. Su labor científica la llevan a cabo los 15 centros de investigación que integran el Consorcio CGIAR, en colaboración con cientos de organizaciones socias.

www.cgiar.org

CVC

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca es la entidad encargada de administrar los recursos naturales renovables y el medio ambiente del Valle del Cauca, que como máxima autoridad ambiental y en alianza con actores sociales propende por un ambiente sano, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida de la población y la competitividad de la región en el marco del desarrollo sostenible.

www.cvc.gov.co

DAGMA

El Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente, DAGMA, es una entidad del Municipio de Santiago de Cali creada desde 1994 para ser la máxima autoridad ambiental y el organismo técnico, director de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales. El propósito del DAGMA es hacer de Santiago de Cali un modelo de ciudad, ambientalmente sostenible, que contribuya a su competitividad en el contexto local y global.

www.cali.gov.co/dagma

Inventario de Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes Criterio para Santiago de Cali

Esta es una publicación de la **Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)**, el **Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)** y el **Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA)**, a través del Convenio No. 110 de 2015:

"Aunar esfuerzos y recursos humanos, económicos y técnicos para desarrollar acciones en el marco de la mitigación y adaptación al cambio climático en la ciudad de Santiago de Cali".

Rodrigo Guerrero Velasco
Alcalde del Municipio de Santiago de Cali

Rubén Darío Materón Muñoz
Director, CVC

Ruben Echeverría
Director General, CIAT

María del Mar Mozo Muriel
Directora, DAGMA

Comité Técnico del Convenio

Andrés Carmona Tobar
Profesional Especializado, CVC
Supervisor del Convenio

Carlos Arturo Hoyos Gómez
Profesional Especializado, CVC

Gisela Arizabaleta Moreno
Coordinadora del Grupo de Calidad del Aire, DAGMA

Jeimar Tapasco
Coordinador del Convenio, CIAT

Compilación, orientación y edición técnica

Samy Andrés Mafla
Economista, CIAT

Julián David Barrios
Ingeniero Sanitario y Ambiental, CIAT

José Guido Morán Burgos
Geógrafo, CIAT

Frenly Marcela Valero
Ingeniera Ambiental, CIAT



Fuente: <http://goo.gl/cSS43e>



Agradecimientos

La consolidación de este Inventario de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) se logró gracias a la participación activa de los funcionarios del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Este documento cuenta con los valiosos aportes técnicos de las siguientes personas, a quienes agradecemos su participación, aportes en talleres y reuniones, así como el tiempo, interés y motivación dedicados a la construcción de este instrumento.

Edilma Muñoz
Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Cali

Ana Cristina Tabares
Cámara de Comercio de Cali

Marlyn Olave Guapi
Gestión Empresarial, DAGMA

Edgar Humberto Cifuentes
CVC

Asimismo, un agradecimiento especial a todas las personas que participaron en el desarrollo del estudio para la identificación de los sectores carbono-intensivos de Santiago de Cali.

Contenido

Introducción.....	2
Objetivos	3
General.....	3
Específicos	3
Generalidades del municipio de Santiago de Cali	4
Localización, extensión y división político-administrativa	4
Población.....	5
Vivienda	5
Actividades económicas.....	6
Marco teórico	7
Gases de efecto invernadero (GEI)	7
Sectores considerados en la estimación	10
Método de estimación	10
Descripción de etapas	12
Resultados.....	15
Resultados totales.....	15
Categorías principales	26
Indicadores relativos de comparación.....	27
Resultados emisiones de contaminantes criterio	29
Conclusiones	38
Anexos	39
Anexo A. Metodología empleada en el cálculo de emisiones de GEI	39
Anexo B. Metodología empleada en el cálculo de contaminantes criterio.....	94
Bibliografía	119

Cuadros

Cuadro 1.	Total de viviendas, predios y barrios en el municipio de Santiago de Cali.	5
Cuadro 2.	Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento.....	9
Cuadro 3.	Fuentes de información	13
Cuadro 4.	Base de datos en línea consultadas.....	13
Cuadro 5.	Resumen para la selección de factores de emisión según la categoría y el tipo de GEI	14
Cuadro 6.	Resultados de emisiones de GEI para Santiago de Cali en el año 2010.	17
Cuadro 7.	Comparación relativa de resultados de emisiones de CO ₂ eq de Cali, Buga, Tuluá, Bogotá y Colombia.	28
Cuadro 8.	Resultados de emisiones de contaminantes criterio para Santiago de Cali en el año 2010.....	29

Figuras

Figura 1.	Ubicación de Santiago de Cali en el Valle del Cauca y Colombia.....	4
Figura 2.	Población total de Santiago de Cali (área urbana y rural).....	5
Figura 3.	Porcentaje del aporte de cada subsector al PIB de Santiago de Cali.....	6
Figura 4.	Gases de efecto invernadero directos	8
Figura 5.	Etapas de desarrollo para un INGEI.....	12
Figura 6.	Consolidado de resultados por categoría IPCC.	16
Figura 7.	Emisiones de CO ₂ eq en el sector Energía.....	19
Figura 8.	Resultados de las emisiones de las industrias manufactureras y de la combustión y otros sectores.....	20
Figura 9.	Distribución del parque automotor para Cali.....	21
Figura 10.	Resultados de las emisiones en el sector Transporte.....	21
Figura 11.	Participación de emisiones por categoría general en el módulo AFOLU.....	22
Figura 12.	Emisiones de GEI en la gestión de estiércol por especie de animal en el municipio de Santiago de Cali.....	23
Figura 13.	Participación de subcategorías en las emisiones de GEI por fuentes agregadas y de emisión no CO ₂ en la tierra en el municipio de Santiago de Cali.....	23
Figura 14.	Emisiones de gases de efecto invernadero por fuentes agregadas y de emisión no CO ₂ en la tierra en el municipio de Santiago de Cali.	24
Figura 15.	Emisiones de GEI en la categoría tierra en el municipio de Santiago de Cali	25
Figura 16.	Emisiones y absorciones de CO ₂ en tierras de cultivo que permanecen como tales y convertidas en tierras forestales.....	25
Figura 17.	Participación de emisiones por categoría general en el módulo de AFOLU.....	26
Figura 18.	Categorías principales de emisiones de CO ₂ eq.....	27
Figura 19.	Toneladas de CO ₂ por PIB y por habitante. Comparación entre Cali, Palmira, Tuluá, Bogotá y Colombia	28
Figura 20.	Participación de emisiones por contaminante criterio.....	31
Figura 21.	Actividades con mayor participación en las emisiones de COVDM	32
Figura 22.	Actividades con mayor participación en las emisiones de NH ₃	32
Figura 23.	Actividades con mayor participación en las emisiones de N ₂ O	33

Figura 24.	Emisiones de NO generadas por diferentes actividades en el municipio de Santiago de Cali	33
Figura 25.	Actividades con mayor participación en las emisiones de N_2	34
Figura 26.	Emisiones de material particulado PM_{10} generadas en el municipio de Cali	35
Figura 27.	Actividades con mayor participación en las emisiones de $PM_{2.5}$	35
Figura 28.	Actividades con mayor participación en las emisiones de óxido de nitrógeno en el municipio de Cali.....	36
Figura 29.	Actividades con mayor participación en las emisiones de monóxido de carbono generadas en el municipio de Cali.....	36
Figura 30.	Actividades con mayor participación en las emisiones de SO_x	37
Figura 31.	Actividades con mayor participación en las emisiones de partículas totales suspendidas.....	37



Fuente: <http://goo.gl/zMh1nm>

Introducción

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se entiende como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El cambio climático es uno de los problemas más complejos a los que se enfrentan las comunidades actualmente. Por lo tanto, hacerle frente implica acciones que involucren el conocimiento de los actores desde el nivel local hasta el nacional. En ese sentido, la gestión entorno al cambio climático se convierte en un proceso continuo a largo plazo, que deben abarcar de manera transversal los territorios, los sectores productivos e institucionales y los grupos humanos, considerando como prioridad los procesos de mitigación y adaptación,

ya que, de no actuar hoy, los impactos económicos, sociales y ambientales serán mayores a futuro.

Es así como el Inventario de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) para Santiago de Cali, elaborado bajo las guías del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2006) y la estimación de contaminantes criterio mediante las guías de EMEP/CORINAIR-2009 (EEA, 2009), se convierte en una herramienta fundamental para la planificación del territorio, la cual orientará las estrategias de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hacia los sectores más carbono-intensivos y a su vez permitirá establecer una comparación con respecto a las emisiones per cápita estimadas en el inventario nacional, bajo la misma metodología.



Fuente: <http://bit.ly/23f3pxv>

Objetivos

General

Identificar los principales sectores emisores de GEI y las estimaciones de emisiones por cada sector para el municipio de Santiago de Cali en el año 2010.

Específicos

- Identificar cuáles son los sectores más carbono-intensivos que permitan focalizar las estrategias de mitigación contenidas en la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono (EMDBC), el cual hace parte del Plan de Adaptación y Mitigación para el municipio de Santiago de Cali que se viene desarrollando en el municipio.
- Incorporar la metodología IPCC para la elaboración de inventarios de GEI a nivel regional y municipal, y de esta manera poder realizar este tipo de estudios periódicamente.
- Identificar los contaminantes criterio más importantes y las actividades productivas que más están generando este tipo de gases.
- Permitir comparar el nivel de emisiones de GEI de Cali, bajo la metodología IPCC, con municipios del Valle del Cauca en donde ya se han adelantado inventarios de GEI, también con Bogotá y a nivel nacional.



Generalidades del municipio de Santiago de Cali

A continuación se hace una breve descripción económica, demográfica, social y geográfica del municipio de Santiago de Cali, con el propósito de contextualizar el Inventario de Gases de Efecto Invernadero (INGEI).

Localización, extensión y división político-administrativa

El municipio cuenta con 22 comunas y 15 corregimientos. Se estiman aproximadamente 609.935 viviendas a 2013, de las cuales el 98% se encuentran en las comunas y el 2% restante en los corregimientos.

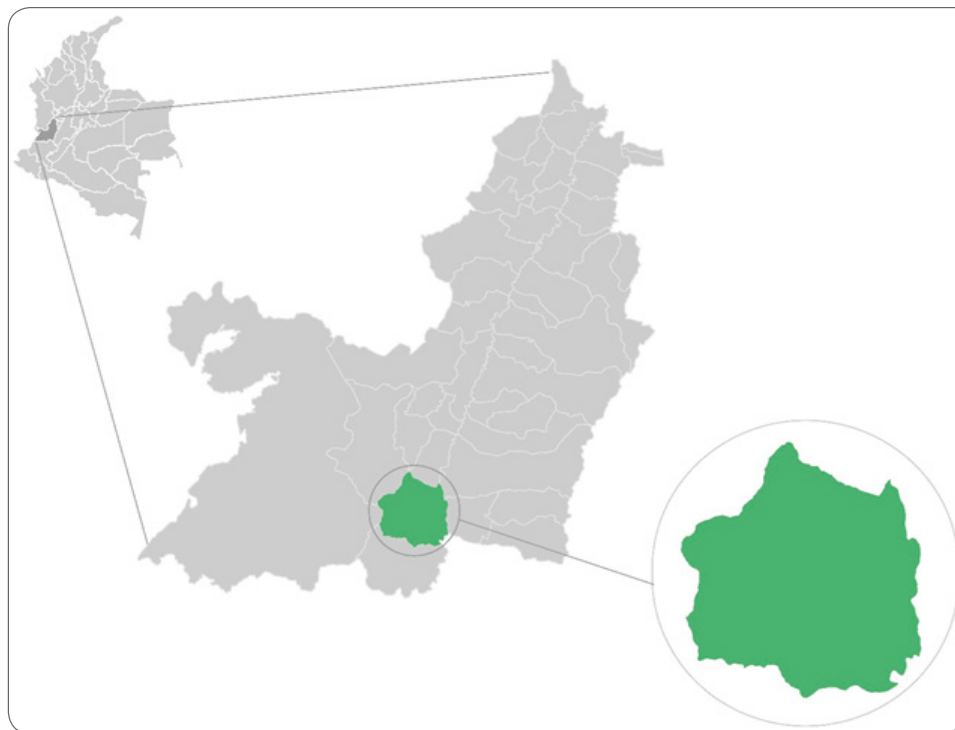


Figura 1. Ubicación de Santiago de Cali en el Valle del Cauca y Colombia.

Población

El municipio de Santiago de Cali registró en 2010 una población de 2.241.602 y en 2013 de 2.369.829, de los cuales, en ambos casos, el 48% son hombres y el 52%

mujeres, aproximadamente. El 98% de la población se concentra en el área urbana y el 2% restante en el área rural (Alcaldía de Santiago de Cali, 2014).

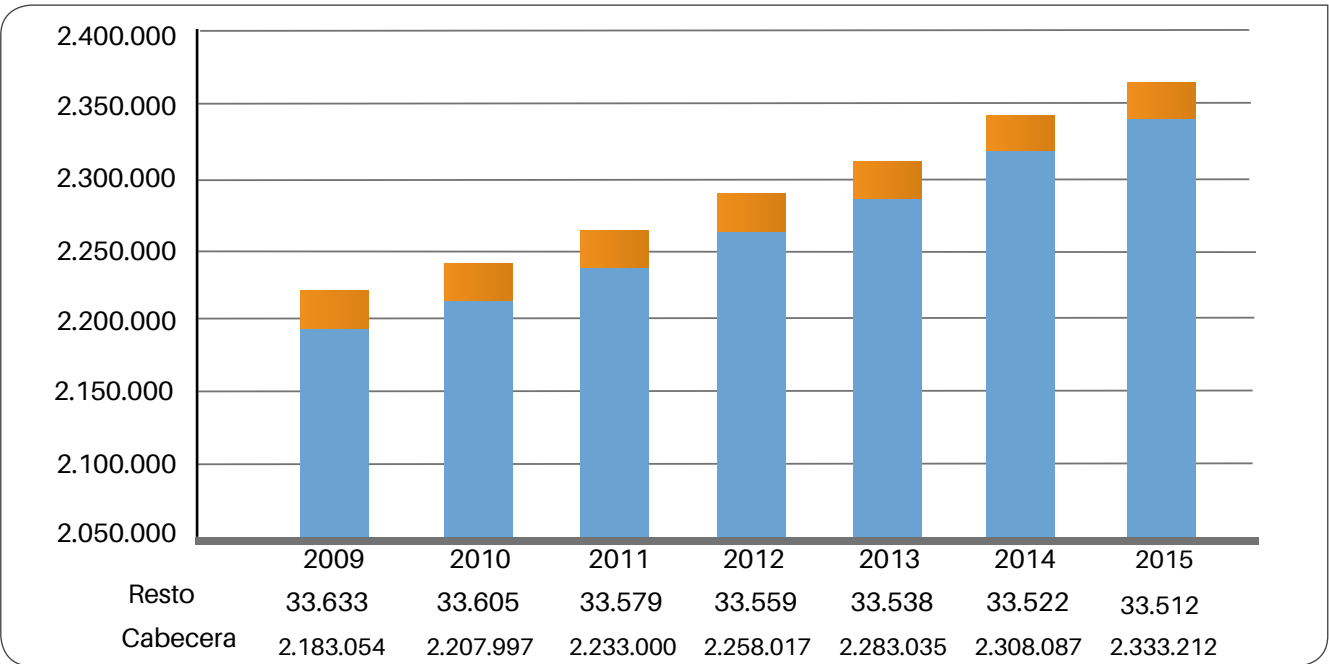


Figura 2. Población total de Santiago de Cali (área urbana y rural).

Vivienda

El municipio de Santiago de Cali, a 2010 tenía un total de 573.930 viviendas, de las cuales el 98% están ubicadas

en el área urbana y el otro 2% en el área rural. También se contabilizaban 625.252 predios.

Cuadro 1. Total de viviendas, predios y barrios en el municipio de Santiago de Cali.

Descripción	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Total viviendas en el municipio	536.392	548.905	561.418	573.930	585.617	597.776	609.935
Viviendas en comunas	526.117	538.635	551.153	563.669	575.359	587.520	599.681
Viviendas en corregimientos	10.275	10.270	10.265	10.261	10.258	10.256	10.254
Total predios en el municipio	566.782	602.667	611.409	625.252	644.875	644.805	(...)
Predios en comunas	542.469	578.572	587.328	601.176	612.683	613.044	(...)
Predios en corregimientos	24.313	24.095	24.081	24.076	32.192	31.761	(...)
Barrios aprobados	248	248	248	248	248	248	248
Urbanizaciones o sectores	89	89	89	89	89	89	88

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali (2014).

Actividades económicas

El municipio de Santiago de Cali, dada su característica intrínseca de municipio urbano y a su posición estratégica con respecto al puerto de Buenaventura, presenta un gran dinamismo económico, sobre todo en el sector comercial y de servicios, sumado al desarrollo industrial apalancado desde el municipio de Yumbo. El Producto Interno Bruto (PIB) de Cali a 2010 ascendió a COP\$22.953 millones según el DANE.

El sector industrial de Cali tiene una gran diversidad, desde empresas de productos químicos y farmacéuticos, pasando por la producción y procesamiento de alimentos; lo cual hace de Cali, junto a municipios vecinos como Yumbo, Palmira y Jamundí, un área metropolitana clave para el desarrollo del suroccidente del País. La importancia de la industria vallecaucana y caleña se ve reflejada tanto a nivel económico como social y laboral; según el DANE para el año 2014, a nivel nacional el sector industrial (8.923 establecimientos en Colombia), logró una producción bruta de COP\$212,5 billones y ocupó a 682.852 personas en promedio. De dicha producción Cali participó con el 10,8 %, es decir, COP\$22,9 billones y el 11,4 % del personal ocupado (77.779). La industria manufacturera tuvo una participación del 25% en la generación del PIB municipal, del cual asciende a COP\$20.193.079 billones (Ver Figura 3). Este sector

y el de servicios son los dos subsectores que mayor dinamismo generan en la economía local.

Aunque a nivel nacional la industria ha tenido una contracción, para el caso de Cali, según el último reporte de la Encuesta Anual Manufacturera en 2014, la industria farmacéutica, de aceros y metales y la producción textil han impulsado el crecimiento industrial en los últimos años en el área metropolitana. Estos datos son congruentes con el valor de la producción que generan cada uno de estos subsectores. Por ejemplo, el sector farmacéutico representa un poco más del 6%, seguido por la producción de aceros con más del 4% y la producción de bebidas gaseosas con aproximadamente el 2,17%, y la producción de llantas con el mismo valor.¹ Lo cual permite concluir que estos cuatro subsectores representan un poco más del 15% del total de la producción de la industria del área metropolitana. Sin embargo, otros sectores emergentes como la industria del papel y la fabricación de productos como jabones y detergentes, siguen ganando relevancia en el municipio.

Adicionalmente, es importante resaltar que en Cali las comunas 4 y 8 son las que concentran el mayor número de empresas, según análisis del DAGMA y la Universidad Autónoma de Occidente, las cuales ascienden a 741 empresas aproximadamente.

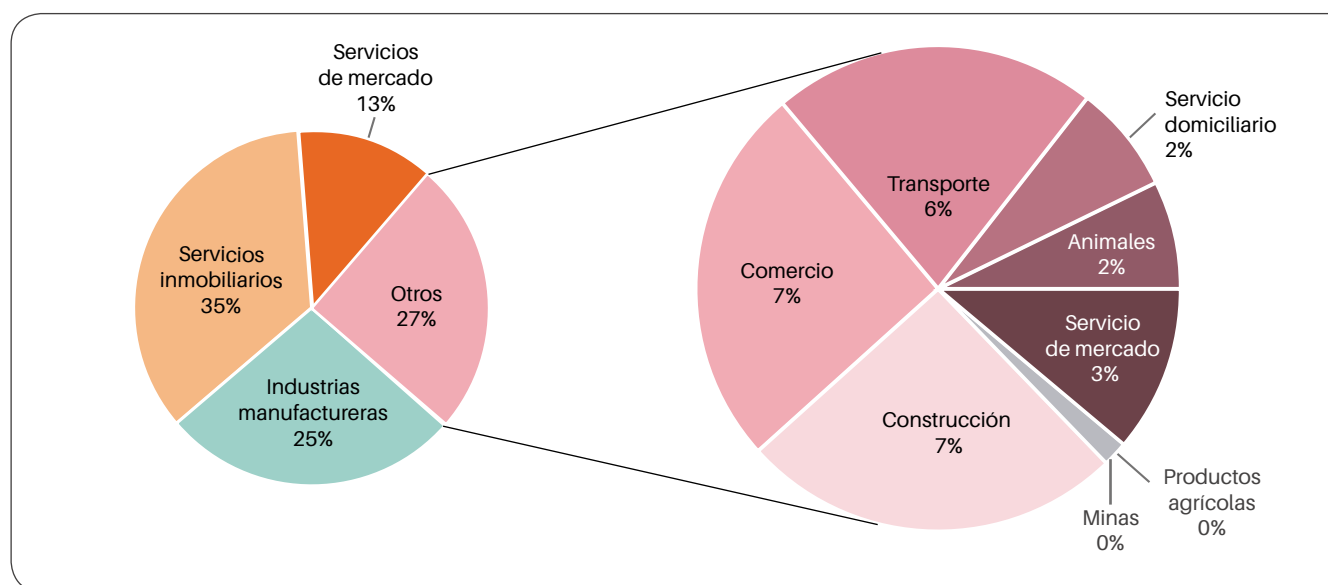


Figura 3. Porcentaje del aporte de cada subsector al PIB de Santiago de Cali.

Fuente: DANE (2010).

¹ De los más de COP\$13 billones que reporta la Encuesta Anual Manufacturera para 2007.



Marco teórico

Gases de efecto invernadero (GEI)

La función principal de un informe de GEI es determinar la magnitud de las emisiones y absorciones por sumidero nacional departamental o municipal de GEI que son directamente atribuibles a la actividad humana (actividades antropogénicas). La investigación aquí desarrollada cumple dos propósitos: el primero es determinar metodologías apropiadas al contexto municipal para la regionalización de inventarios de emisiones GEI, y el segundo estimar el inventario de emisiones de GEI para el municipio de Santiago de Cali, desagregado sectorialmente como herramienta orientadora para el Plan de Adaptación y Mitigación de Cambio Climático de Cali, y el desarrollo de la Estrategia Municipal de Desarrollo bajo en Carbono para Cali.

Definición

Los GEI son aquellos que tienen la capacidad de absorber y reemitir radiación infrarroja, lo cual produce un cambio en la irradiación neta vertical sobre la tierra al que se le denomina forzamiento radiativo. A mayor forzamiento radiativo de un GEI, mayor su potencial de calentamiento.

GEI directos

De acuerdo con la guía del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para los inventarios, son aquellos gases que inducen directamente de manera diferenciada al forzamiento radiativo y al calentamiento global (Ver Figura 4).

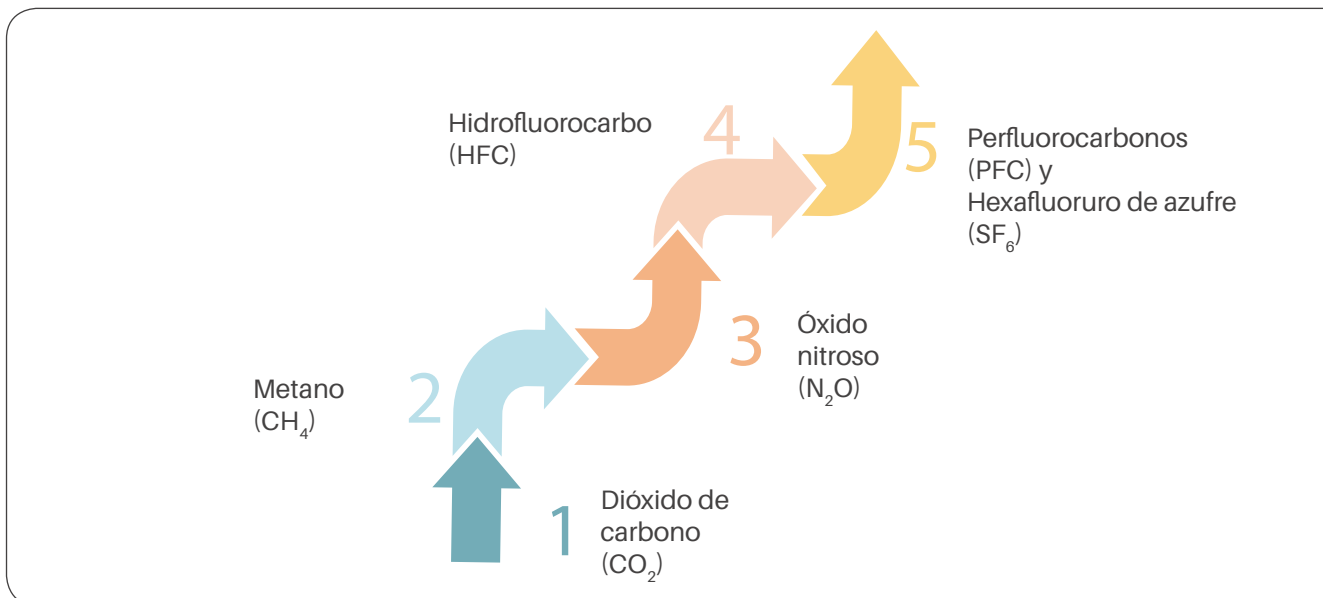


Figura 4. Gases de efecto invernadero directos.

Dentro de los GEI “directos” de mayor interés considerados bajo las guías del IPCC, los cuales inducen directamente al forzamiento radiativo y al calentamiento global, encontramos: el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. Estos son los gases contemplados en este inventario regional.

Fuentes de Dióxido de carbono (CO_2): Es uno de los gases más representativos del sistema atmósfera-oceano-tierra, ya que es el GEI más importante asociado a actividades humanas, y el segundo gas más importante en el calentamiento global después del vapor de agua (León Aristizábal, 2007).

La mayor fuente a nivel mundial, es la combustión de combustibles fósiles. El cambio de uso del suelo y las actividades de silvicultura también son importantes, tanto para las emisiones de CO_2 por deforestación como por captura de CO_2 por medio de sumideros forestales. Algunos procesos de producción industrial también emiten CO_2 , pero estas fuentes son menos participativas dentro del inventario. En Colombia la principal fuente de emisión de este gas, son las categorías de quema de combustibles fósiles en especial por el sector de transporte.

Fuentes de metano (CH_4): Las fuentes más importantes a nivel mundial son la producción de ganado, el cultivo del arroz inundado, la producción de combustibles fósiles, el procesamiento y el transporte (sobre todo la producción de carbón y la producción y transporte de

gas natural). Son las fuentes más importantes de metano (CH_4) a nivel mundial. En Colombia, este gas es uno de los más importantes dado que su principal fuente de emisión se atribuye a procesos de fermentación entérica con una participación a nivel nacional del 38% sobre las emisiones totales del país.

Fuentes de óxido nitroso (N_2O): Las emisiones de N_2O son más significativas en aquellas regiones con un sector agrícola y ganadero importante, ya que provienen principalmente de la aplicación de fertilizante, la quema de biomasa y el manejo de estiércol animal. Las emisiones de óxido nitroso generadas por los suelos agrícolas se deben principalmente al proceso microbiológico de la nitrificación y desnitrificación del suelo. Se pueden distinguir tres tipos de emisiones: las directas desde el suelo, las directas de óxido nitroso del suelo debido a la producción animal (pastoreo) y las indirectas generadas por el uso de fertilizantes (IDEAM, 2007).

Para los demás GEI directos, Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), denominados a su vez gases fluorados, estos cuentan con un alto potencial de calentamiento; sin embargo, su aporte a las emisiones de GEI globales son muy pequeñas. Sus fuentes principales son la transmisión y distribución eléctricas, y varios procesos de producción industrial, como el aluminio, la producción y procesamiento de magnesio y la manufactura de semiconductores.

GEI indirectos

Por medio del impacto en la química de la atmósfera, estos gases pueden modificar la vida atmosférica de los GEI directos o contribuir a la formación de aerosoles:

- Monóxido de carbono (CO)
- Óxido de nitrógeno (NO_x),
- Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM)
- Dióxido de azufre (SO₂)

Aunque no son muy relevantes en el impacto sobre el calentamiento atmosférico, si son de gran importancia para temas de salud pública y calidad del aire, por lo tanto, para el caso del inventario de GEI en Santiago de Cali, estos gases serán calculados, y tenidos en cuenta a manera de información.

Potencial de calentamiento de los GEI.

El potencial de calentamiento global, utiliza el índice relativo de forzamiento global, el cual fue creado para

ubicar a varios GEI en una misma escala. Según Seinfeld, et al., (2006), los factores de los cuales dependen estos índices son: 1) La fuerza con la que una determinada especie absorbe la radiación infrarroja y la ubicación de sus longitudes de onda de absorción espectral y, 2) La vida atmosférica (o tiempo de respuesta) de las especies en la atmósfera.

En esa medida el forzamiento radiativo (FR) antropogénico total es positivo (2,3 W/m² desde 1750) conduciendo a una ganancia neta de energía por parte del sistema climático. Las nuevas estimaciones realizadas en 2005 del FR (para el año 2011) son un 44% más alta que las anteriores. Esto se debe, a partes iguales, a la estimación a la baja del papel de los aerosoles (que tienen un efecto global de enfriamiento) y al incremento de las concentraciones de la mayoría de los gases de efecto invernadero en los seis años transcurridos desde la anterior estimación (que tienen un efecto global de calentamiento) (Fundación Biodiversidad et al., 2013).

Cuadro 2. Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento.

Nombre del gas	Concentración preindustrial (PPMV*)	Concentración Actual (PPMV*)	Persistencia en la atmósfera (años)	Principal actividad humana que lo genera	Potencial de calentamiento PCG**
Dióxido de carbono (CO ₂)	280	~400	Variable	Combustibles fósiles, producción de cemento y cambios de uso del suelo	1
Metano (CH ₄)	0,7	~1,8	12	Combustibles fósiles, arrozales, vertederos y ganado.	21
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,27	~0,32	114	Fertilizantes y procesos de combustión industriales. Quema de biomasa. Manejo de estiércol animal.	310
Hidrofluorocarbonos (HFC-23)	-		270	Electrónica y refrigerantes.	11.700
Perfluorocarbonos (PFC-14)	-		50.000	Producción primaria de aluminio, incineración de plásticos y cerámicas y equipos de refrigeración.	6.500
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	-		3.200	Fluidos dieléctricos.	23.900

* Ppmv = Partes por millón en volumen. ** PCG = Calculado para un horizonte temporal de 100 años.

Fuente: IPCC (2007).

Sectores considerados en la estimación

Para la estimación de emisiones de GEI de una determinada región o territorio, el IPCC define cuatro sectores:

Energía: Se cuantifican las emisiones de GEI generados por las actividades antrópicas relacionadas con la quema, extracción y manipulación de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo y sus derivados). El sector energético comprende, principalmente:

- La exploración y explotación de las fuentes primarias de energía.
- La conversión de las fuentes primarias de energía en formas más utilizables en refinerías y centrales eléctricas.
- La transmisión y distribución de los combustibles
- El uso de combustibles en aplicaciones estacionarias y móviles. Las emisiones surgen de estas actividades por combustión y como emisiones fugitivas, o por escape sin combustión.

Procesos industriales: Para este sector se cuantifican las emisiones de GEI provocadas por los procesos industriales, por el uso de GEI en los productos y por los usos no energéticos del carbono contenido en los combustibles fósiles. Las principales fuentes de emisión son las descargas provenientes de los procesos industriales, que generan la transformación de materia prima a partir de procesos tanto físicos como químicos en productos donde se han usado GEI. De la misma manera contempla los usos no energéticos del carbono contenido en los combustibles fósiles.

Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés): El uso y la gestión de la tierra tiene su influencia sobre una diversidad de procesos del ecosistema que afectan a los flujos de los gases de efecto invernadero, tales como la fotosíntesis, la respiración, la descomposición, la nitrificación/desnitrificación, la fermentación entérica y la combustión. Estos procesos incluyen transformaciones del carbono y del nitrógeno provocadas por los procesos biológicos (actividad de microorganismos, plantas y animales) y físicos (combustión, lixiviación y escurrimiento).

Identificando los GEI de mayor interés como CO_2 , el N_2O y el CH_4 , tenemos que en el caso del CO_2 , los flujos de este entre la atmósfera y los ecosistemas se controlan fundamentalmente por captación, mediante la fotosíntesis de las plantas y por liberación, a través de la respiración, la descomposición y la combustión de materia orgánica.

Para el N_2O los ecosistemas lo emiten como subproducto de la nitrificación y la desnitrificación. En el caso del CH_4 , este es emitido por metanogénesis en condiciones anaeróbicas en suelos y depósitos de estiércol, a través de la fermentación entérica y durante la combustión incompleta durante el quemado de materia orgánica

Desechos: Para este sector las emisiones estimadas se realizan en las siguientes categorías:

- Eliminación de desechos sólidos.
- Tratamiento biológico de los desechos sólidos.
- Incineración e incineración abierta de desechos.
- Tratamiento y eliminación de aguas residuales.

Método de estimación

Para elaborar el inventario de GEI y contaminantes criterio de Santiago de Cali, inicialmente se tuvo en cuenta la importancia de seleccionar una técnica de medición (común) que permitiera comparar los resultados obtenidos con experiencias o casos de estudio desarrollados en Colombia bajo la misma escala o nivel de estimación.

De acuerdo con lo anterior, se optó por emplear la metodología desarrollada por el IPCC aplicadas en la construcción de inventarios nacionales y la guía EMEP/CORINAIR (EEA, 2009). Las cuales se caracterizan por ser muy flexibles en los cálculos mediante el uso de métodos con distinto grado de complejidad, que varían de acuerdo a la disponibilidad de información y el costo de estimación que conlleve realizar para las distintas fuentes de emisión la cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes criterio. Resultando ser muy útiles para la identificación y priorización de sectores en políticas y proyectos de mitigación a nivel departamental y nacional.

El IPCC ha elaborado distintas versiones o revisiones (1996, 2003 y 2006) de la metodología para cuantificar las emisiones de GEI en sectores relacionados con la producción de energía, procesos industriales, agricultura, silvicultura y desechos. A nivel nacional por ejemplo, se han elaborado cuatro inventarios en distintos periodos de tiempo (1990, 1994, 2000 y 2004) con base en la versión de 1996 y a la fecha de entrega de este producto, ya se cuenta con los resultados del inventario nacional de GEI con la versión de 2006; mientras que a nivel regional, departamentos como Cundinamarca y Huila han implementado las versiones de 1996 y 2006, respectivamente.

Las directrices del IPCC de 2006 representan un paso adelante de las de 1996, 2000 y 2003; en el sentido de que se retroalimenta de las experiencias obtenidas, incorpora nueva información científica y proporciona mayor número de recomendaciones sobre los métodos de estimación para asegurar mayor calidad en los inventarios.

En relación a este último punto, las directrices del IPCC de 2006 incorporan el método por niveles mediante árboles de decisión, que guían al compilador del inventario en la selección del nivel que se debe utilizar para estimar la categoría o fuente de emisión de interés con base en la disponibilidad de información y tecnología. En este sentido, Pulido (2012) explica los niveles de complejidad metodológica de la siguiente manera:

- Método de nivel (Tier) 1. Es el menos detallado, utiliza factores de emisión por defecto tomados de la literatura y en algunos casos datos de actividad también tomados de fuentes internacionales, generalmente con amplio rango de incertidumbre e información general del sector que produce las emisiones.
- Método de nivel (Tier) 2. Se basa principalmente en procedimientos relacionados con balances de masa y factores de emisión de procesos específicos para el país o región de estudio. Usualmente se emplean

modelos matemáticos para obtener factores de emisión que representen las condiciones locales del sitio de interés donde se desea ejecutar el inventario.

- Método de nivel (Tier) 3. Es una evaluación rigurosa y detallada de la fuente que requiere de inventarios detallados de la infraestructura y de factores de emisión específicos (*in situ*) de la fuente o sector a evaluar. Por lo general, en este método se requiere de mayor inversión económica por la demanda de equipos sofisticados y movimiento de personal.

A pesar de las discrepancias que puedan existir entre los distintos niveles de complejidad metodológica el IPCC (2006) señala que todos los niveles tienen por objeto proporcionar estimaciones insesgadas, y la exactitud y la precisión deberían, en general, mejorar del Nivel I al III. la provisión de diferentes niveles permite a los compiladores de inventarios utilizar métodos coherentes con sus recursos y dirigir sus esfuerzos a esas categorías de emisiones y absorciones, que hacen su mayor aporte a los totales y a las tendencias de las emisiones nacionales o regionales.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomó la decisión de elaborar el inventario de GEI y contaminantes criterio de Santiago de Cali con base en las directrices del IPCC (2006) y EMEP/CORINAIR, ya que esto hace parte de la invitación efectuada por la CMNUCC y el Convenio de Ginebra sobre Contaminación Transfronteriza a Larga Distancia (UNECE LRTAP) en actualizar las directrices.

En este sentido, se llevó a cabo el inventario de gases de efecto invernadero (INGEI) y contaminantes criterio para este municipio siguiendo estas etapas: i) identificación del propósito del inventario; ii) selección de la técnica de medición; iii) identificación de las fuentes o sectores de emisión; iv) recopilación de información; v) selección de factores de emisión; vi) cálculo de emisiones; y vii) generación y documentación de resultados (ver Figura 5).

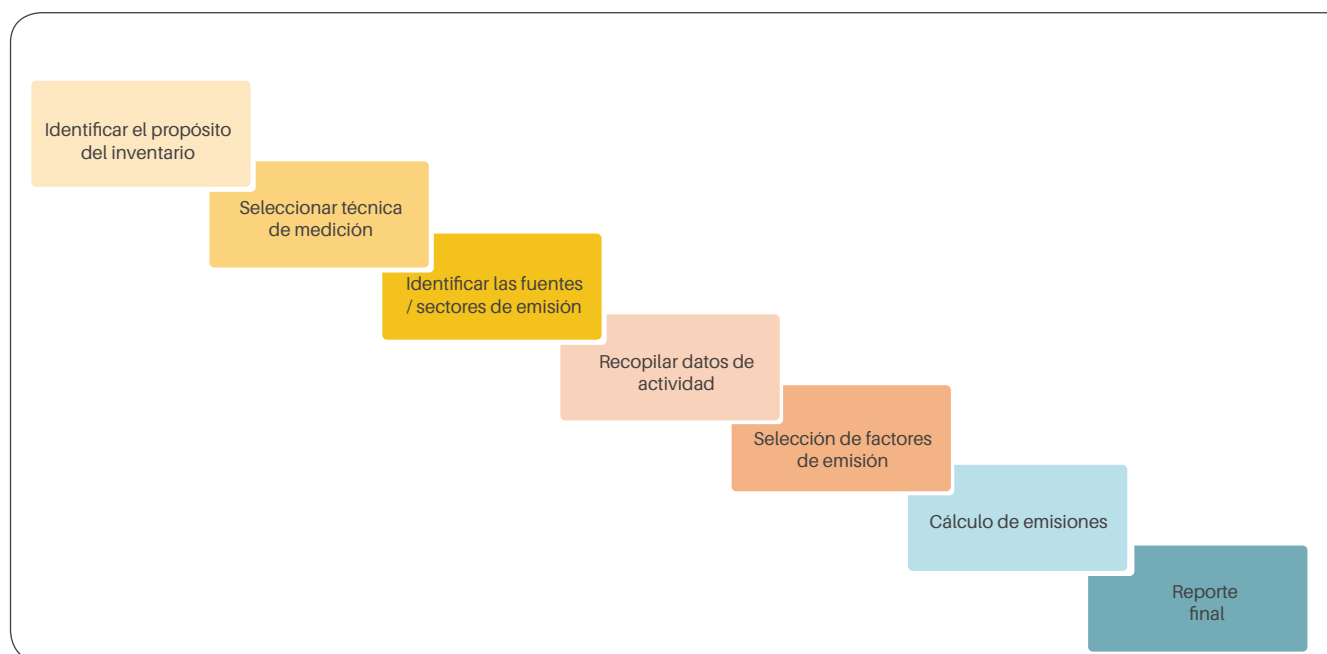


Figura 5. Etapas de desarrollo para un INGEI.

Descripción de etapas

Etapas No. 1: Selección de la técnica de medición

Para la estimación de las emisiones de GEI a escala municipal se empleó una metodología de cálculo de Nivel I, teniendo en cuenta las directrices del IPCC (2006). Mediante esta metodología se lograron cuantificar específicamente las emisiones de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido de nitrógeno (N_2O) y para esto se consideraron como variables de entrada la actividad de los sectores energía, industria, AFOLU y desechos.

La Ecuación 1 muestra de forma general la expresión matemática que se empleó para medir o calcular las emisiones de CH_4 , CO_2 y N_2O en el sector energía, industria, AFOLU y desechos.

Ecuación 1

$$\text{Emisión} = \text{Actividad} * \text{Factor de emisión}$$

En esta ecuación la variable **Emisión** fue considerada como la variable de respuesta principal, y permitió evaluar la cantidad o nivel de emisión de los INGEI en cada uno de los sectores. La variable **Actividad** representó el

consumo de combustible (m^3), producción de carbón (ton), superficie de área quemada (ha) y población de ganado (cabezas) etc. Mientras que la variable **Factor de emisión** se consideró como un coeficiente para transformar la **Actividad** de cada sector en **Emisión**.

Etapas No. 2: Identificación de las fuentes/ sectores de emisión

Para identificar las fuentes o sectores de emisión en la región se realizó previamente un proceso de documentación de las directrices dadas por el IPCC (2006) en cuanto a la generación de INGEI, con el fin de conocer los diferentes sectores a los cuales era posible contabilizarle sus emisiones. En este sentido, se realizó un proceso de consulta tanto en instituciones públicas como privadas, para indagar sobre la actividad productiva de los sectores en el municipio y que por ende fueran considerados como objeto de estudio para la ejecución del inventario, tal como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Fuentes de información.

Fuente
Gobernaciones, alcaldías
Secretarías de tránsito y agricultura
Autoridades ambientales (CVC, IDEAM, DAGMA)
Cámara de comercio
Empresas prestadoras de servicios públicos: Empresas municipales de Cali (EMCALI), Promoambiental Cali, entre otros
Agremiaciones: Federación Nacional de Ganaderos (FEDEGAN), Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI)
Otros

Etapa No. 3: Recopilación de información

Luego de identificar la técnica de medición y las fuentes de emisión se procedió a recopilar información o datos que permitieran calcular las emisiones de GEI por sector. Los datos recopilados estuvieron orientados básicamente al proceso productivo realizado por cada sector; es decir, consumo de combustible y materia prima, producción de carbón, cantidad de materia orgánica en residuos sólidos y líquidos, tasas de deforestación, entre otros.

La manera como se recopiló la información fue principalmente mediante encuestas, y consulta de bases de datos documentadas y en línea como las que se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Base de datos en línea consultadas.

Fuente	Enlace
Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)	http://www.dane.gov.co
AGRONET	http://www.agronet.gov.co
ICA	http://www.ica.gov.co/
Sistema Único de Información (SUI)	http://www.sui.gov.co
Otros	

Etapa No. 4: Identificación y selección de factores de emisión

La selección de los factores de emisión se realizó de acuerdo con el nivel de agregación sugerido por el IPCC (2006) para metodologías de cálculo fundamentadas en el Nivel I, ya que mediante este tipo de procedimientos

se facilita la identificación de factores de emisión, que varían en función del sector y categoría así como de la actividad que se realice en los mismos.

Cuadro 5. Resumen para la selección de factores de emisión según la categoría y el tipo de GEI

Sectores	Categorías	Factores de emisión según categoría y tipo de GEI		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Energía	Industria de la energía	A	A	A
	Industrias manufactureras y de la construcción	A	A	A
	Transporte terrestre	A	A	A
	Comercial/Institucional	A	A	A
	Residencial	A	A	A
	Agrícola	A	A	A
AFOLU	Fermentación entérica	NA	A	NA
	Gestión del estiércol	NA	A	A
	Tierras forestales que permanecen como tales	A	NA	NA
	Tierras de cultivo que permanecen como tales	A	NA	NA
	Incendios forestales (quema de biomasa)	A	A	A
	Aplicación de urea	A	NA	NA
	Emisiones directas de N ₂ O de suelos gestionados	NA	NA	A
	Emisiones indirectas de N ₂ O de suelos gestionados	NA	NA	A
	Emisiones indirectas de N ₂ O por gestión de estiércol	NA	NA	A
	Cultivo de caña	NA	A	A
	Eliminación de desechos sólidos	NA	A	NA
Desechos	Tratamiento y eliminación de aguas residuales	NA	A	A

A = Factor de emisión que aplica.

NA = Factor de emisión que no aplica.

Etapa No. 5: Generación y documentación de resultados

Luego de recopilar la información y seleccionar los factores de emisión se cuantificaron las emisiones de GEI por cada una de las categorías mencionadas en la etapa No. 4 y posteriormente se consolidaron en una tabla para la generación de informes como lo señala el IPCC (2006i). Un punto importante a tener en cuenta dentro de cada uno de los inventarios generados es que en algunos sectores (Energía y AFOLU principalmente) se emplearon factores de emisión de nivel superior (II y III) o “domésticos” desarrollados para Colombia por instituciones como el IDEAM y FEDEARROZ. Todo esto con el objetivo de reducir el grado de incertidumbre de

los datos generados y lograr a su vez que estos puedan ser comparables con las diferentes experiencias que se tienen a nivel nacional.

Por otro lado, también se debe tener en cuenta que cada una de las emisiones estimadas se transformaron luego a unidades de CO₂ eq mediante la multiplicación con el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) de cada GEI, de modo que en la generación del informe los resultados se expresan en términos de Gg CO₂ eq, tal como se muestra en la Ecuación 2 para realizar dicha transformación.

Ecuación 2

$$\text{Emisión GEI}_{\text{CO}_2 \text{ Equivalente}} = \text{Emisión GEI} * \text{GWP}$$

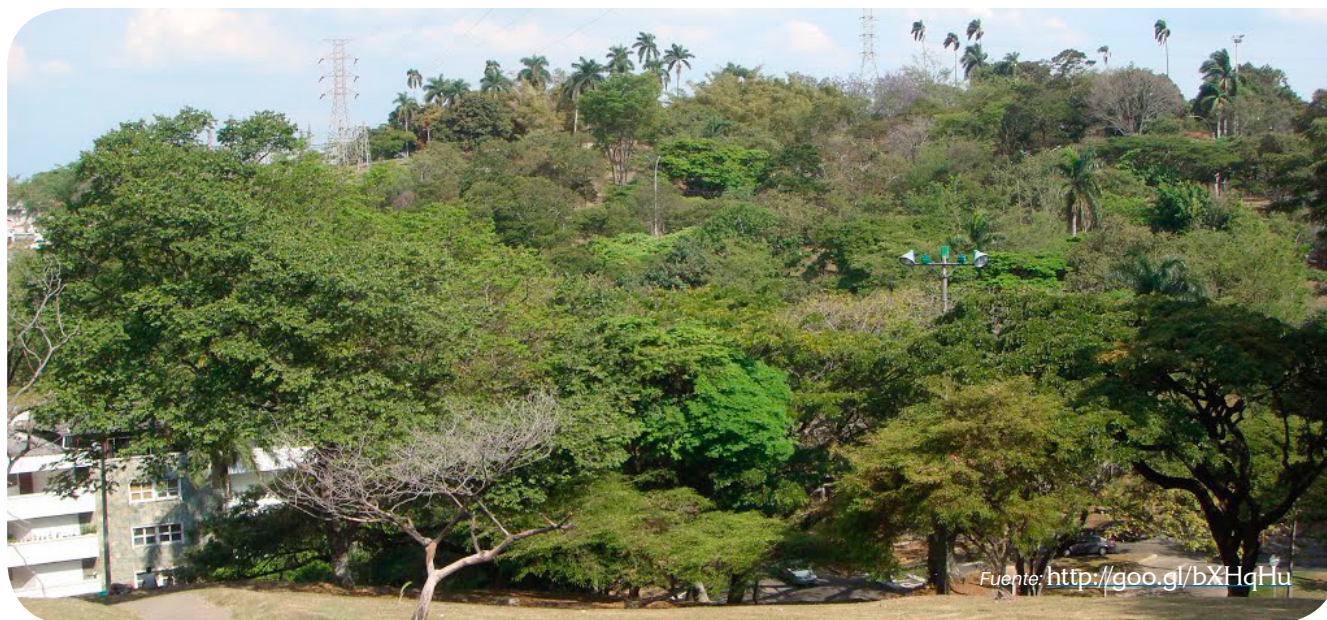
Donde:

$\text{Emisión GEI}_{\text{CO}_2 \text{ eq}}$ = Emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O en términos de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ (Gg)

Emisión GEI = Emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O (Gg de cada gas)

GWP= Potencial de calentamiento global para CO_2 (1 Gg $\text{CO}_2 \text{ eq. Gg CO}_2^{-1}$); CH_4 (21 Gg $\text{CO}_2 \text{ eq Gg CH}_4^{-1}$); y N_2O (310 Gg $\text{CO}_2 \text{ eq Gg N}_2\text{O}$).

Para ver en detalle la metodología utilizada para la estimación de las emisiones de GEI en cada sector, consultar los Anexos.



Resultados

Resultados totales

En el municipio de Santiago de Cali, a partir del año 2010, se estimaron 4.174.608 ton de CO_2 equivalente (eq), donde el sector energía con 2,9 millones de ton de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ genera el 71% del total de las emisiones, de las cuales el 82% de dichas emisiones provienen principalmente del transporte terrestre. Los desechos también son un sector importante en el nivel de

emisiones generado en el municipio con un 1,1 millones de ton de $\text{CO}_2 \text{ eq}$, que representan un 27,4% sobre el total de las emisiones. Esto se explica en gran medida por el tamaño de la población, el nivel de urbanización y el tamaño del parque automotor, lo cual analizaremos en detalle en la explicación de resultados de cada sector.

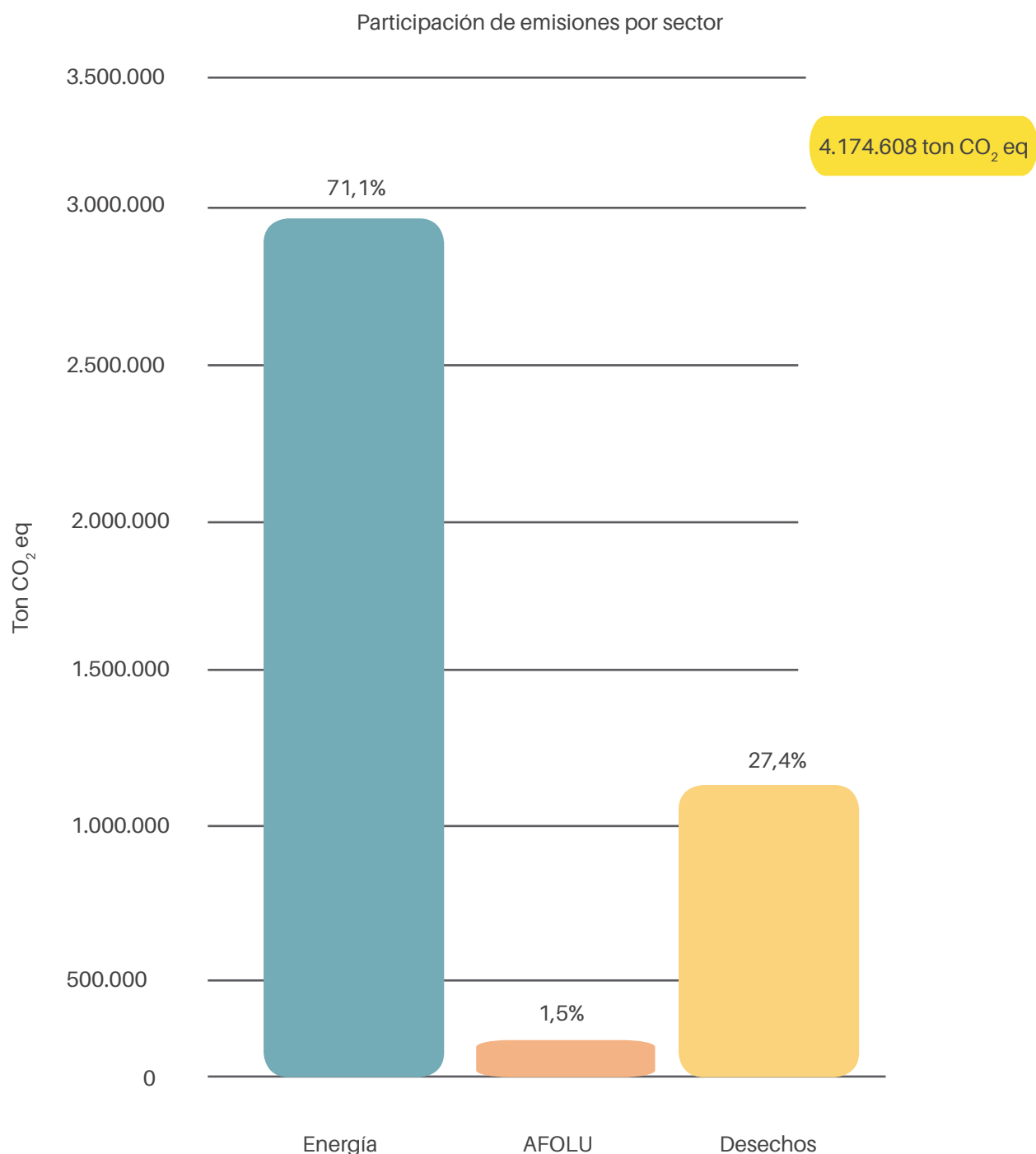


Figura 6. Consolidado de resultados por categoría IPCC.

Vale la pena mencionar, que no se lograron estimar emisiones para la categoría de procesos industriales debido a la ausencia de información específica del procesamiento para la industria química, la industria de metales, el uso de solventes, entre otros. Sin embargo,

también es importante resaltar que el peso de esta categoría a nivel nacional y en algunos inventarios regionales y municipales, no llega a ser más del 5% del total de las emisiones (IDEAM et al., 2015).

Cuadro 6. Resultados de emisiones de GEI para Santiago de Cali en el año 2010.

Sector			Emisiones de GEI (ton CO ₂ eq)			Emisiones netas totales	Participación sobre el total
			Emisiones de GEI en Casanare (ton CO ₂ eq)				
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Ton CO ₂ eq	%
1. Energía			2.906.308	25.134	35.761	2.967.204	71,1%
1A Industrias manufactureras y de la construcción	1.A.2.	Quema de combustibles sector Industrial	285.243,9	378,9	721,1	286.343,9	6,9%
	1.A.2.A	Hierro y acero	20.733,9	147,3	290,1	21.171,3	0,5%
	1.A.2.B	Metales no ferrosos	659,3	0,4	1,1	660,9	0,0%
	1.A.2.C	Productos químicos	78.535,5	33,8	49,3	78.618,6	1,9%
	1.A.2.D	Pulpa, papel e imprenta	28.507,0	12,3	21,8	28.541,0	0,7%
	1.A.2.E	Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	83.034,9	104,2	193,5	83.332,6	2,0%
	1.A.2.F	Minerales no metálicos	77,1	0,1	0,1	77,3	0,0%
	1.A.2.G	Equipos de transporte	12.752,9	4,9	7,2	12.765,0	0,3%
	1.A.2.H	Maquinaria	1.245,2	0,5	0,7	1.246,4	0,0%
	1.A.2.J	Madera y productos de madera	262,3	1,4	2,7	266,4	0,0%
	1.A.2.L	Textiles y cuero	44.885,4	68,2	146,2	45.099,7	1,1%
	1.A.2.M	Industria no especificada	14.550,3	5,9	8,5	14.564,7	0,3%
1A4 Otros sectores	1.A.4.a	Quema de combustibles sector comercial	130.594,3	227,6	75,3	130.897,2	3,1%
	1.A.4.b	Quema de combustibles sector residencial	43.928,0	83,6	244,9	44.256,5	1,1%
	1.A.4.c	Agricultura, silvicultura y pesca	91,1	0,0	0,1	91,2	0,0%
1A3b Transporte terrestre	1.A.3bi	Automóviles	1.456.343,0	14.553,0	20.770,0	1.491.666,0	35,7%
	1.A.3biii	Camiones para servicio pesado y autobuses	920.117,0	9.198,0	13.020,0	942.335,0	22,6%
	1.A.3biv	Motocicletas	70.082,0	693,0	930,0	71.705,0	1,7%

(Continúa)

(Continuación)

1B1 Emisiones Fugitivas Proveniente de la fabricación de combustible	1.B.1ai	Minas subterráneas		0,04		0,04	0,0%
3. Agricultura, Silvicultura y otros usos de la Tierra (AFOLU)			15.465	6.035	42.660	63.477	1,5%
3A Ganado	3.A.1	Fermentación entérica		3.010,0		3.010,0	0,1%
	3.A.2	Gestión del estiércol		2.928,0	12.563,0	15.491,0	0,4%
3B Tierra	3.B.1a	Tierras forestales que permanecen como tales	3.306,0			2.834,3	0,1%
	3.B.1bi	Tierras de cultivo convertidas en tierras forestales	11.373,0			11.161,0	0,3%
	3.B.3bii	Tierras de cultivos convertidas en praderas o pastizales	101,0			101,0	0,0%
3C Fuentes Agregadas y fuentes de emisión N ₂ O ₂ En la Tierra	3.C.1a	Incendios forestales y de vegetación (inducidos por el hombre, otros)		84,1	2,5	86,5	0,0%
	3.C.1b	Incendios de cultivos agrícolas		13,4	0,3	13,7	0,0%
	3.C.3	Aplicación de Urea	684,9			684,9	0,0%
	3.C.4	Emisiones directas de N ₂ O de los suelos gestionados			14.635,0	14.635,0	0,4%
	3.C.5	Emisiones indirectas de N ₂ O de los suelos gestionados			5.665,3	5.665,3	0,1%
	3.C.6	Emisiones indirectas de N ₂ O resultantes de la gestión del estiércol			9.794,0	9.794,0	0,2%

(Continúa)

(Continuación)

4. Desechos				1.119.184	24.744	1.143.928	27,4%
4D Desechos	4.A	Eliminación de desechos sólidos		389.222,6		389.222,6	9,3%
	4.A	Eliminación de desechos sólidos en el relleno sanitario de Navarro		458.869,4		458.869,4	11,0%
	4.D	Tratamiento y eliminación de aguas de residuales domésticas		271.091,7	24.743,9	295.835,6	7,1%
Total de las emisiones en ton de CO ₂ eq						4.174.607,9	100%

Sector energía

Las categorías de análisis en el sector energía se muestran en el Anexo A en la Figura A1.1. Asimismo, en la Figura A1.2 se muestran los datos específicos que se siguieron para estimar las emisiones en el sector. En los anexos también se presentan los Factores de Emisión (FE) utilizados para cada combustible en el Cuadro A1.1, y el consumo de combustibles por sector industrial el cual fue homologado con las categorías IPCC (Cuadro A1.3).

Las emisiones del módulo energía corresponden a un 72% del total de las emisiones de GEI, las cuales totalizan 2.967.204 de ton de CO₂ eq. La mayor parte de emisiones provienen del parque automotor, el cual tiene alrededor del 59% del total de las emisiones, del municipio; los automóviles son la categoría más importante con casi el 35% del total de las emisiones que equivalen a 1.491.666 ton de CO₂ eq. A continuación mostramos las emisiones por subsector en la categoría energía y su peso relativo en el subsector.

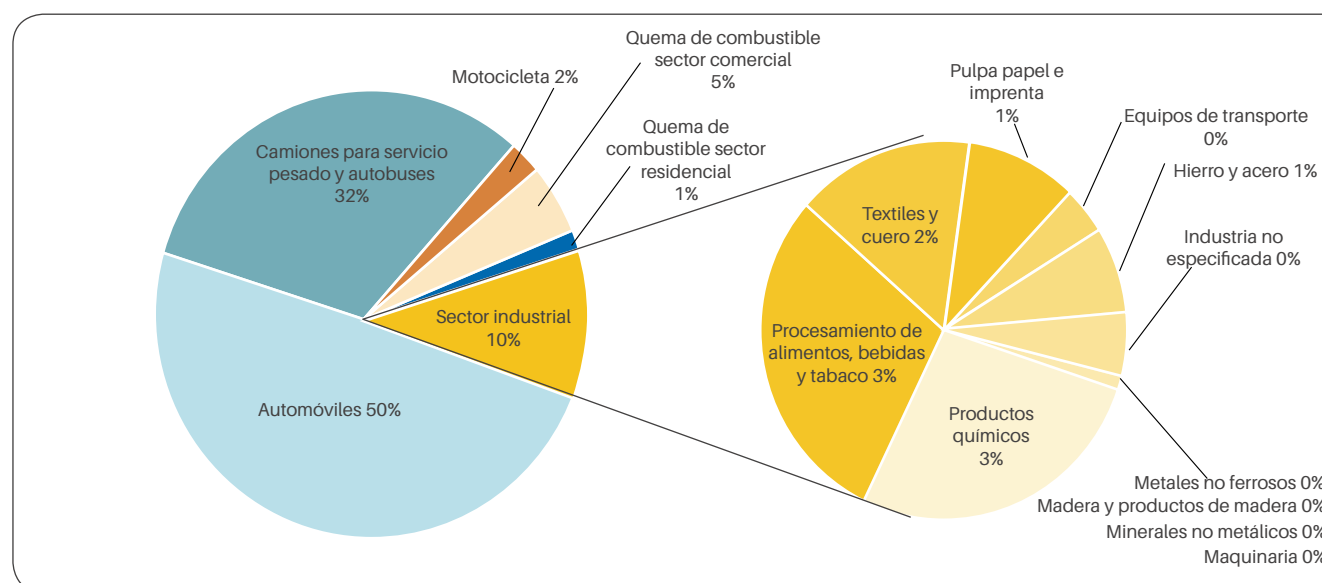


Figura 7. Emisiones en CO₂ eq en el Sector Energía.

Resultados - Quema de combustibles fósiles: (1A2) Industrias Manufactureras y de la Construcción; (1A4) otros sectores

Se estimaron las emisiones de los gases CO₂, CH₄ y N₂O generados por el sector industrial, residencial y comercial, en el municipio de Santiago de Cali a partir de la metodología referenciada en las directrices del IPCC 2006, versión revisada del 2006, los resultados de la estimación se consolidan en el siguiente cuadro. En

referencia a los datos de consumo utilizados, como es el caso del carbón, gas natural, ACPM, GLP, madera y carbón, fueron consultados de la información recopilada por el DAGMA a las empresas directamente, situación que ayuda a disminuir el nivel de incertidumbre en el dato de emisión final. Por lo anterior, se recomienda usar para futuras actualizaciones del inventario fuentes primarias para evitar altos niveles de incertidumbre en los cálculos finales.

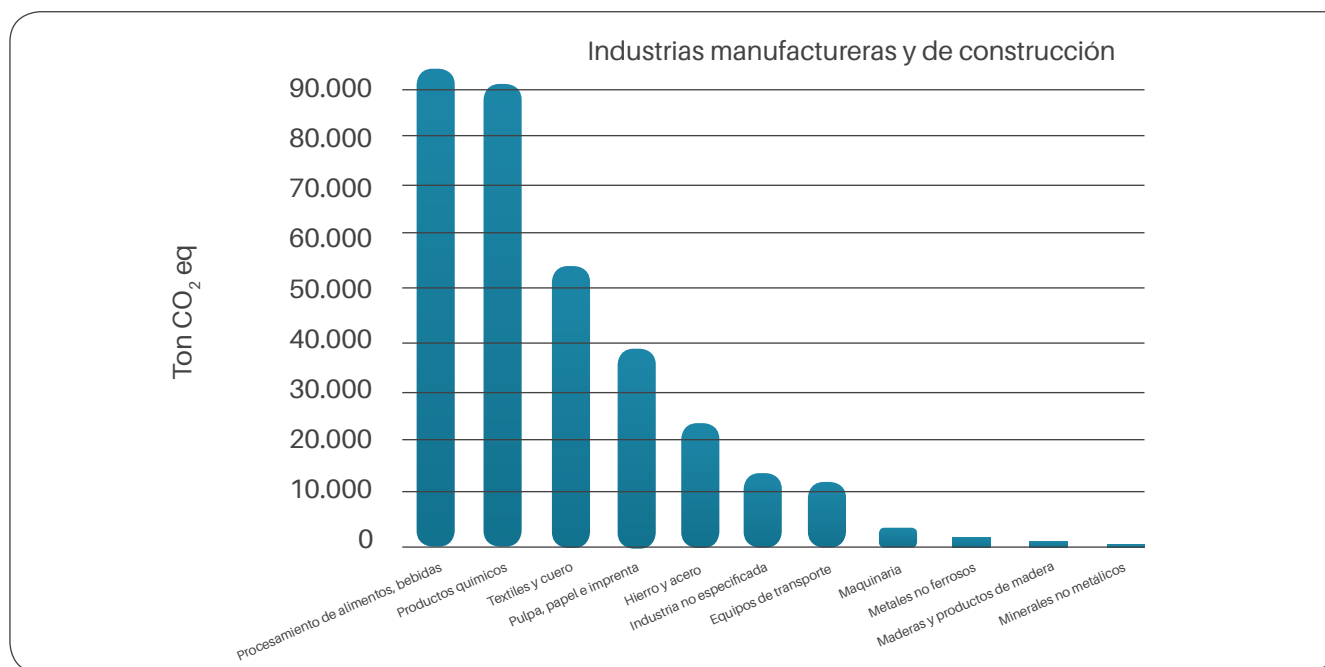


Figura 8. Resultados de las emisiones de las industrias manufactureras y de la construcción y otros sectores.

Fuente: Elaborado con base en los datos de actividad recopilados por el DAGMA y la CVC.

Transporte (1A3b) Transporte terrestre

Para el municipio de Santiago de Cali, se estimaron las emisiones de GEI generadas por el sector transporte a partir del consumo de combustibles fósiles. Para las emisiones de GEI generadas por el consumo de gasolina en el transporte terrestre, se usó información sobre el parque automotor al año 2010, a partir de los documentos generados por la Alcaldía Municipal de Santiago de Cali.

Según información obtenida de la Alcaldía Municipal, se estima que en Santiago de Cali el medio de transporte más utilizado por los ciudadanos es el vehículo particular, con 346.082 unidades registradas para el año 2010.

Por otra parte, Cali cuenta con diversidad en lo relacionado al transporte público colectivo urbano y suburbano,

entre bus, busetas y microbús, imponiéndose el taxi con 16.485 unidades (Figura 9).

El consumo de combustibles fósiles es el principal dato de actividad requerido para estimar emisiones de GEI en el sector de transporte. En ese sentido y ya que el municipio no cuenta con ese dato consolidado anualmente, se generó la consulta del parque automotor municipal al año 2010, con el propósito de lograr cuantificar las emisiones generadas por esta categoría. En los anexos, se presenta la información respectiva, la cual se obtuvo por medio del CIAT a partir de la información obtenida en diferentes fuentes de información, como los anuarios estadísticos, la información recopilada por el DAGMA y K2 Ingeniería Ltda. e información de la Secretaría de Tránsito Municipal. Adicional al parque automotor para el año de interés,

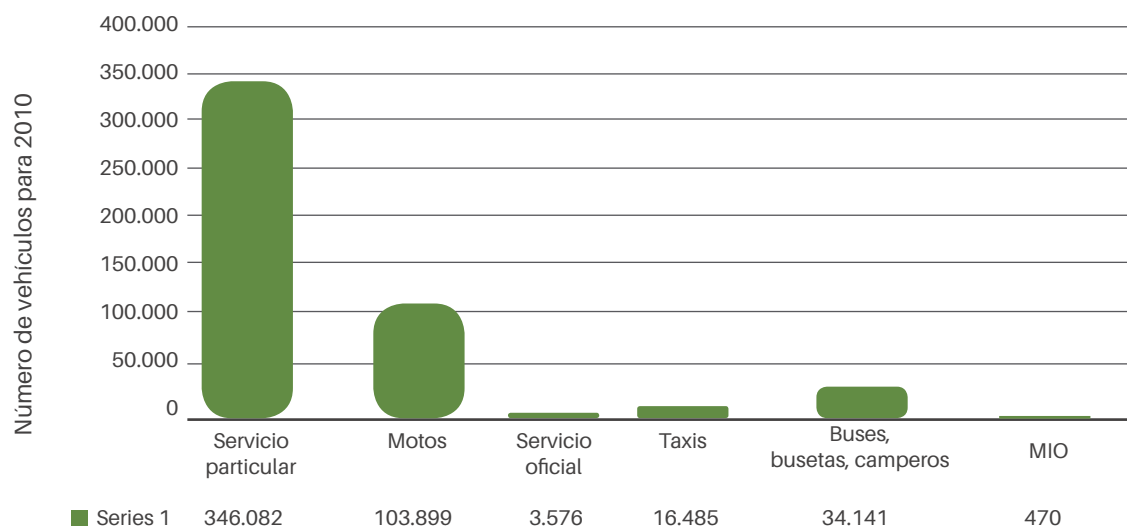


Figura 9. Distribución del parque automotor para Cali.

se requiere, como dato de actividad, información correspondiente a los kilómetros recorridos en un año para cada modo de transporte y el consumo total de gasolina consumido. Debido a que el municipio no cuenta con la información relacionada, se consultaron estimaciones nacionales, para este caso en especial, a partir de la información generada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y publicada en el documento “Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia”

La información correspondiente a la distancia típica recorrida en un año por modo de transporte fue estimada a partir de la información suministrada en la Figura A1.13. En lo relacionado a la distancia promedio recorrida por modo de transporte, se estimó a partir de la información referenciada en el Anexo A, en las Figuras A1.13 y A1.14. De acuerdo a la metodología empleada, correspondiente a las directrices del IPCC 2006, se estimaron las emisiones de los gases CO_2 , CH_4 y N_2O para el sector de transporte terrestre, y posteriormente se convirtieron a CO_2 eq.

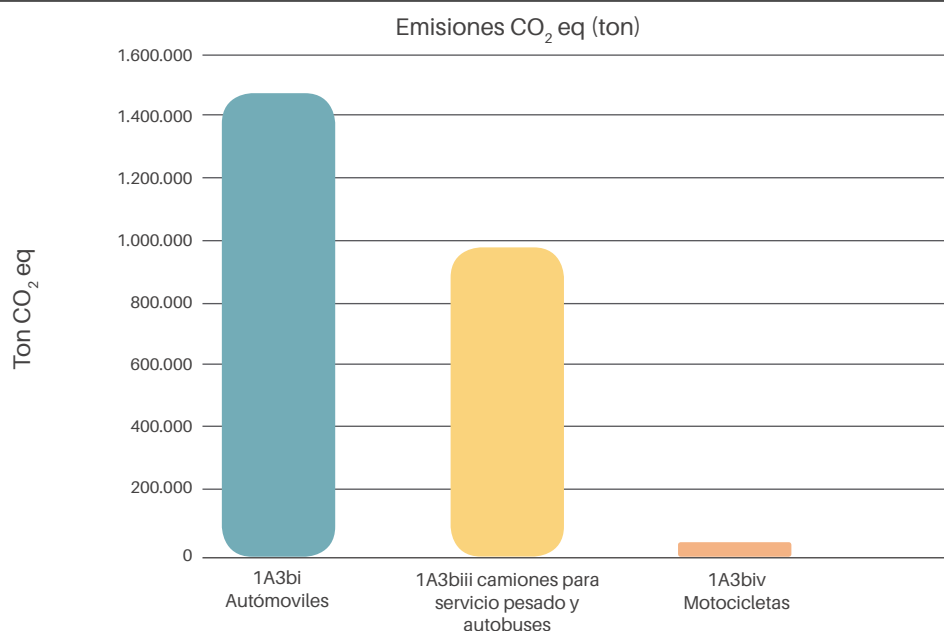


Figura 10. Resultados de las emisiones en el Sector Transporte.

Fuente: Elaborado con base en los datos de actividad recopilados por el DAGMA y la CVC.

También se estimaron las emisiones de CH_4 que se generaron en la minería subterránea de carbón, los datos fueron extraídos de la UPME. Para las 51.406 ton de carbón producidas en 2011, se estimaron 0,04 ton de CH_4 en CO_2 eq.

Sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU)

Las emisiones del módulo de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) para el municipio

de Santiago de Cali corresponden en un 49% a las generadas por fuentes agregadas y fuentes de emisión NOCO_2 en la tierra, equivalentes a 30.879 ton de CO_2 , seguido con un 29% por la categoría de ganado, que incluye la fermentación entérica y la gestión del estiércol; equivalente a 18.201 ton de CO_2 y, finalmente un 22% correspondiente a la categoría de tierra con una participación de 14.096 ton de CO_2 .

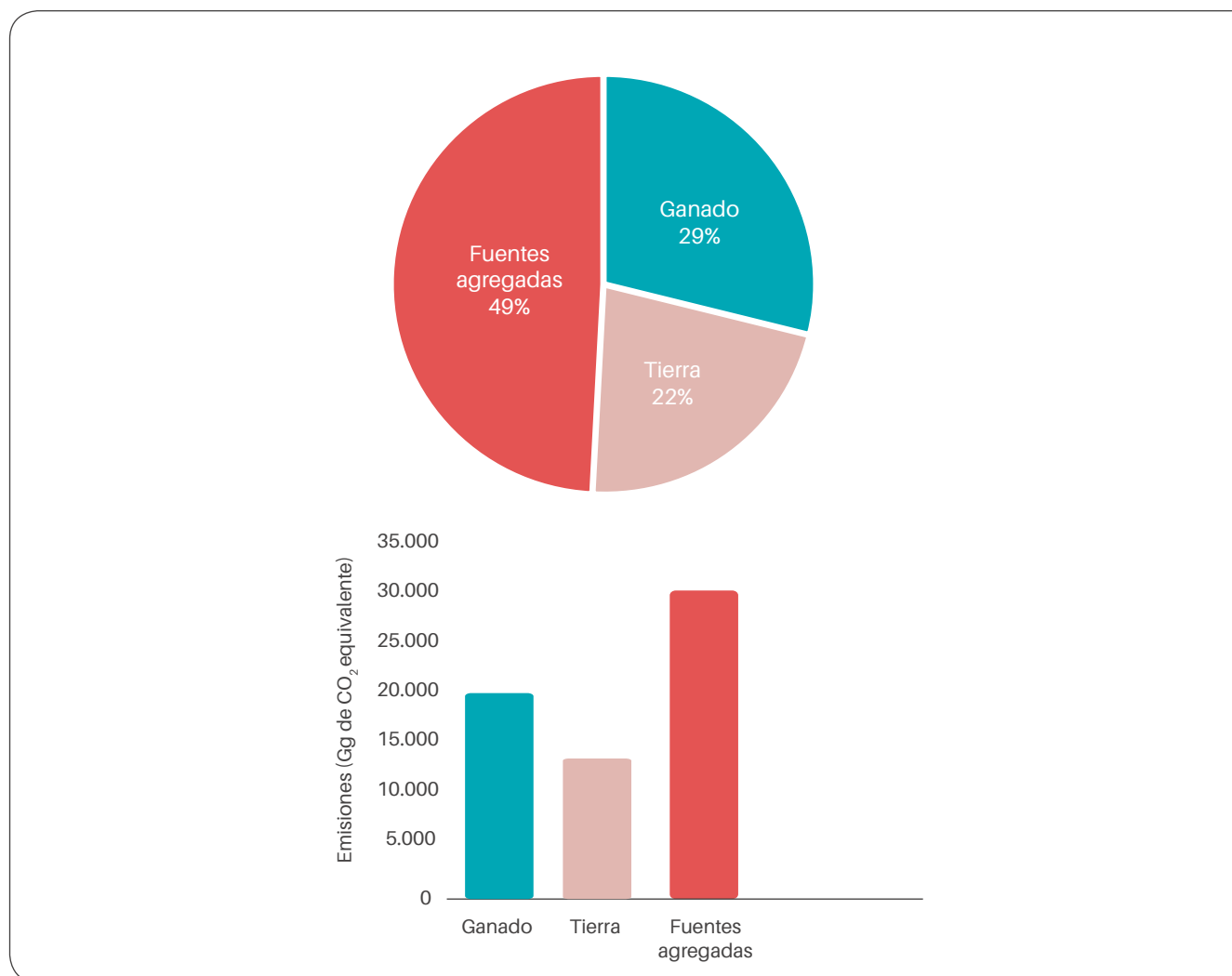


Figura 11. Participación de emisiones por categoría general en el módulo de AFOLU.

Las emisiones de GEI correspondientes a la categoría 3A Ganado, estuvo representada en gran parte por las actividades relacionadas con la gestión de estiércol y en menor medida por los procesos de fermentación entérica; esto evidencia un porcentaje de participación del 84% y 16%, respectivamente. Teniendo en cuenta esto, en la Figura 12 se presentan las emisiones particulares

generadas por cada especie de animal; sobresaliendo la gestión de estiércol de los pollos de engorde, las aves ponedoras y los porcinos de cría. Esto se puede explicar gracias al elevado número de población de cada una de las especies y por el sistema de gestión de estiércol (manejo de sólidos y corral de engorde).

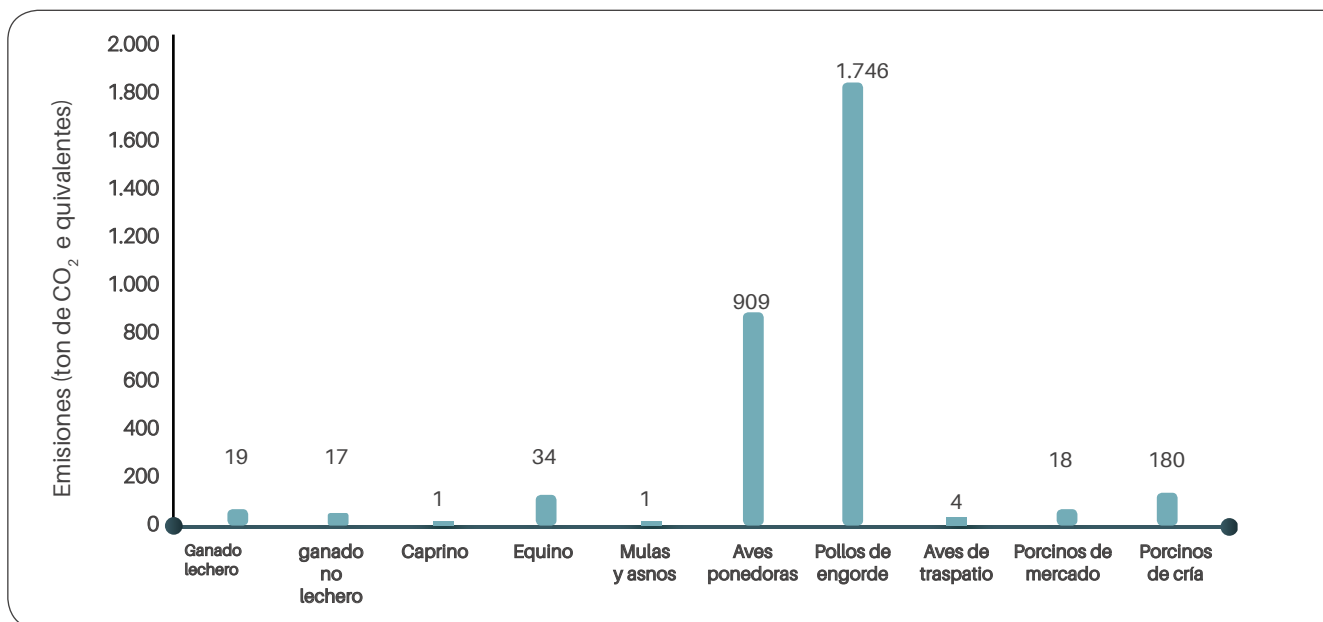


Figura 12. Emisiones de GEI en la gestión de estiércol por especie de animal en el municipio de Santiago de Cali.

Las fuentes agregadas y de emisión no CO₂ en la tierra constituyen otra fuente importante de emisiones de GEI, debido a que en esta categoría confluyen varias actividades que son fuente de gases como el CO₂, CH₄ y N₂O. Dentro de dichas actividades se incluyen los incendios forestales, de vegetación y cultivos agrícolas, la aplicación de urea, las emisiones directas e indirectas de N₂O de suelos gestionados y las emisiones indirectas de N₂O resultantes de la gestión de estiércol. Siendo la

categoría que más aporta GEI las emisiones directas de N₂O de los suelos gestionados representando el 48% de estas, equivalente a 14.635 ton de CO₂; seguido por las emisiones indirectas de N₂O resultantes de la gestión del estiércol con un 32% del total equivalente a 9.794 ton de CO₂ y las emisiones indirectas de N₂O de los suelos gestionados cuya participación es del 18% equivalente a 5.665 ton de CO₂ (Ver Figura 13 y 14).

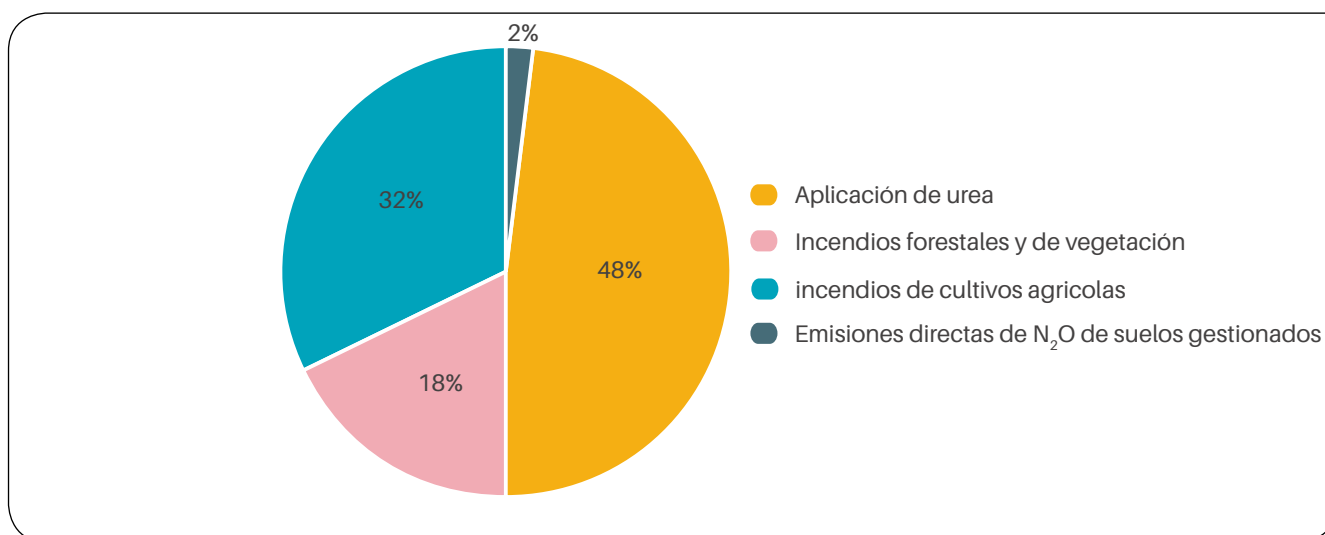


Figura 13. Participación de subcategorías en las emisiones de GEI por fuentes agregadas y de emisión no CO₂ en la tierra en el municipio de Santiago de Cali.

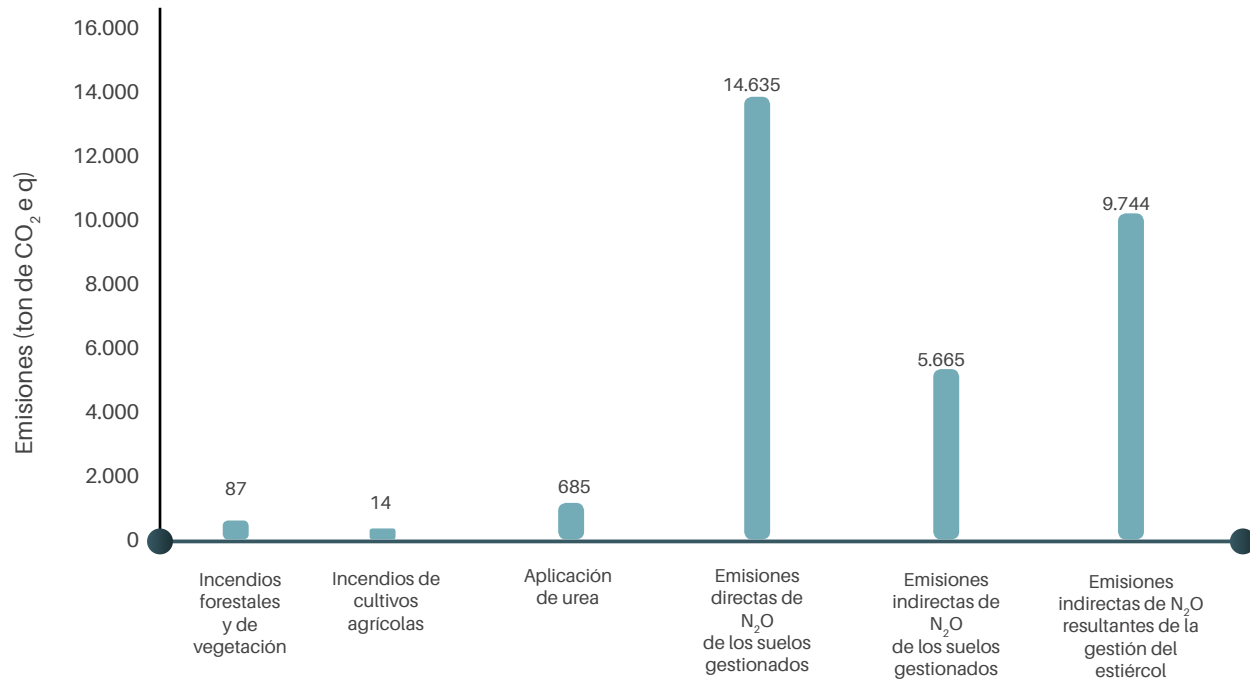


Figura 14. Emisiones de gases de efecto invernadero por fuentes agregadas y de emisión no CO₂ en la tierra en el municipio de Santiago de Cali.

De acuerdo a lo anterior y considerando que la categoría de emisiones directas de N₂O de los suelos gestionados obtuvo la mayor participación, es preciso resaltar que esto está directamente relacionado con la cantidad de nitrógeno aplicado al suelo por medio de la orina y estiércol de animales en pastoreo. Es congruente entonces que la mayor proporción de nitrógeno aplicado corresponde a la categoría de estiércol de animal, representando un 99,28% del total aplicado equivalente a 2.466 ton de N al año, seguido por los cambios en el uso del suelo que representa el 0,38% equivalente a 9,6 ton al año y en menor proporción los residuos agrícolas y fertilizantes sintéticos representados con el 0,2 % y 0,1%, respectivamente con cantidades inferiores

a 6 ton por año, dando como resultado final 2.484 ton de nitrógeno aplicadas en el 2010. Por otra parte, las emisiones y absorciones generadas en la categoría tierra están condicionadas a los usos de la misma y a los depósitos de carbono existentes la relación neta entre las absorciones y emisiones, dio como resultado que el mayor emisor de GEI son las tierras convertidas en tierras forestales representando el 79% del total, seguido por las tierras forestales que permanecen como tales equivalente al 20% y, finalmente las tierras de cultivos convertidas en praderas o pastizales representadas en el 1%. Las emisiones netas pueden verse con mayor detalle en la Figura 15.

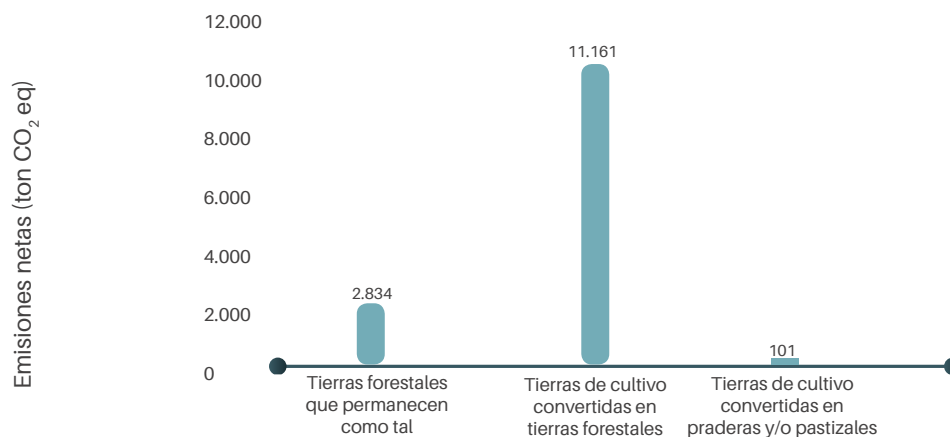


Figura 15. Emisiones de GEI en la categoría Tierra en el municipio de Santiago de Cali.

Por otra parte, la Figura 16 muestra las absorciones de CO₂ en tierras de cultivo que permanecen como tales y convertidas en tierras forestales, evidenciando una absorción de 472 y 212 ton de CO₂ en el año 2010, si

bien existe una absorción en estas categorías está es muy baja respecto a las emisiones generadas, por lo cual es preciso investigar en alternativas o tecnologías que ayuden a incrementar el nivel de absorción.

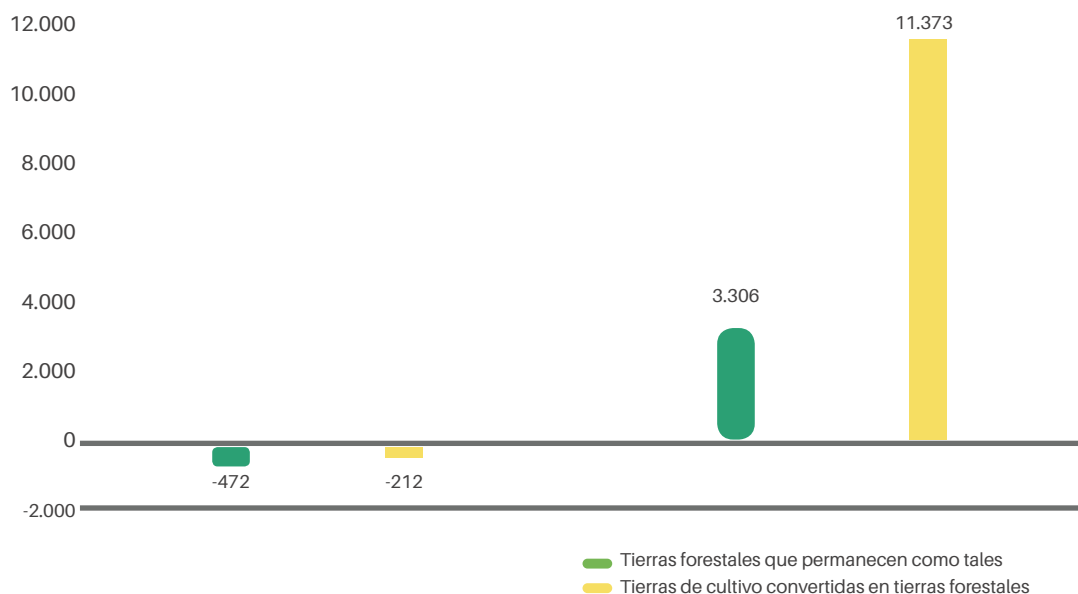


Figura 16. Emisiones y absorciones de CO₂ en tierras de cultivo que permanecen como tales y convertidas en tierras forestales.

Sector desechos

Las emisiones de GEI generadas por la subcategoría eliminación de residuos sólidos abarca más del 40% de las emisiones totales en el municipio de Santiago de Cali, correspondiente a las emisiones provenientes de la degradación de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario de Navarro correspondientes a 458.869

ton de CO₂, seguido por la eliminación de los desechos sólidos del año de estudio con el 34% equivalentes a 389.222 ton de CO₂. Lo cual es congruente con lo obtenido a nivel nacional, en donde Pedraza y Saldarriaga (2009) encontraron que el 88,42% de las emisiones totales logradas en el sector residuos estaban representadas por la disposición de residuos sólidos dispuestos en tierra.

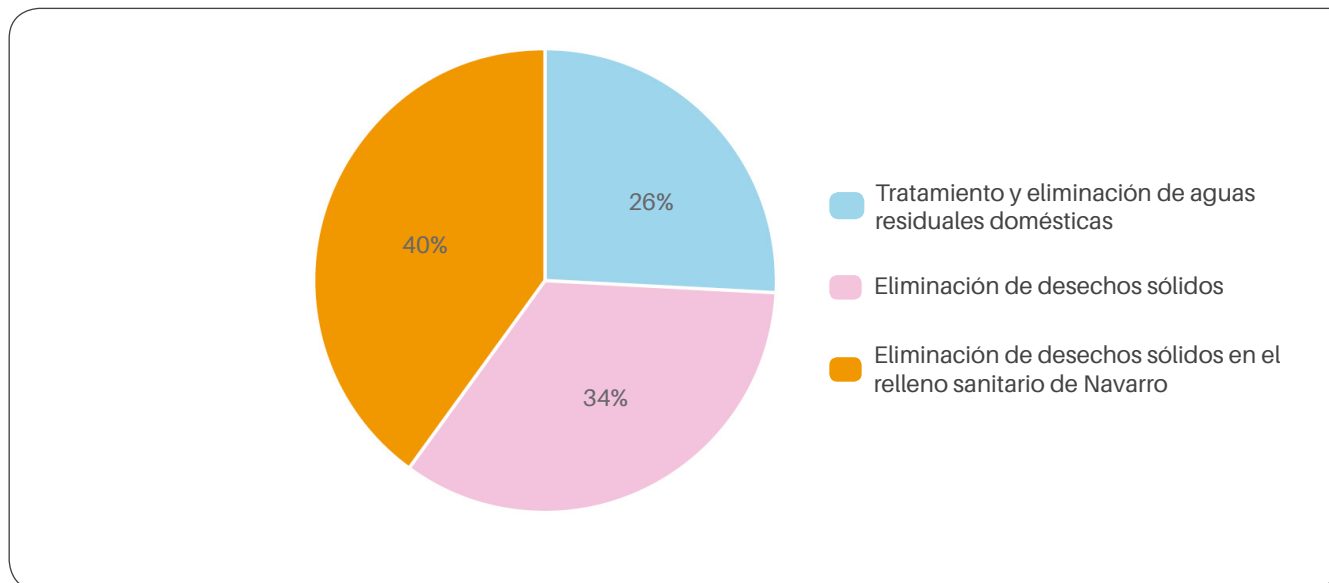


Figura 17. Participación de emisiones por categoría general en el módulo de AFOLU.

Categorías principales

Para el caso de municipios muy urbanos y con potencial de crecimiento, es muy común encontrarse con que la categoría más representativa proviene del tamaño de su parque automotor, como es el caso de las emisiones por los automóviles, camiones y autobuses, los cuales representan el 57% del total de las emisiones. También el tamaño de la población incide en que la eliminación de desechos, y el tamaño de los rellenos sanitarios sea muy importante, en este caso representan aproximadamente el 20%. Seguido de estas categorías, está la emisión

proveniente del consumo de combustibles en la industria, los cuales representan el 8,7%; que aunque no es muy significativo sobre las emisiones totales, también merece sumo cuidado y manejo de tipo ambiental, sobre todo en el uso inadecuado de calderas. Estas medidas están en mayor detalle en la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono (EMDBC) contenidas dentro del Plan de Adaptación y Mitigación para Santiago de Cali.

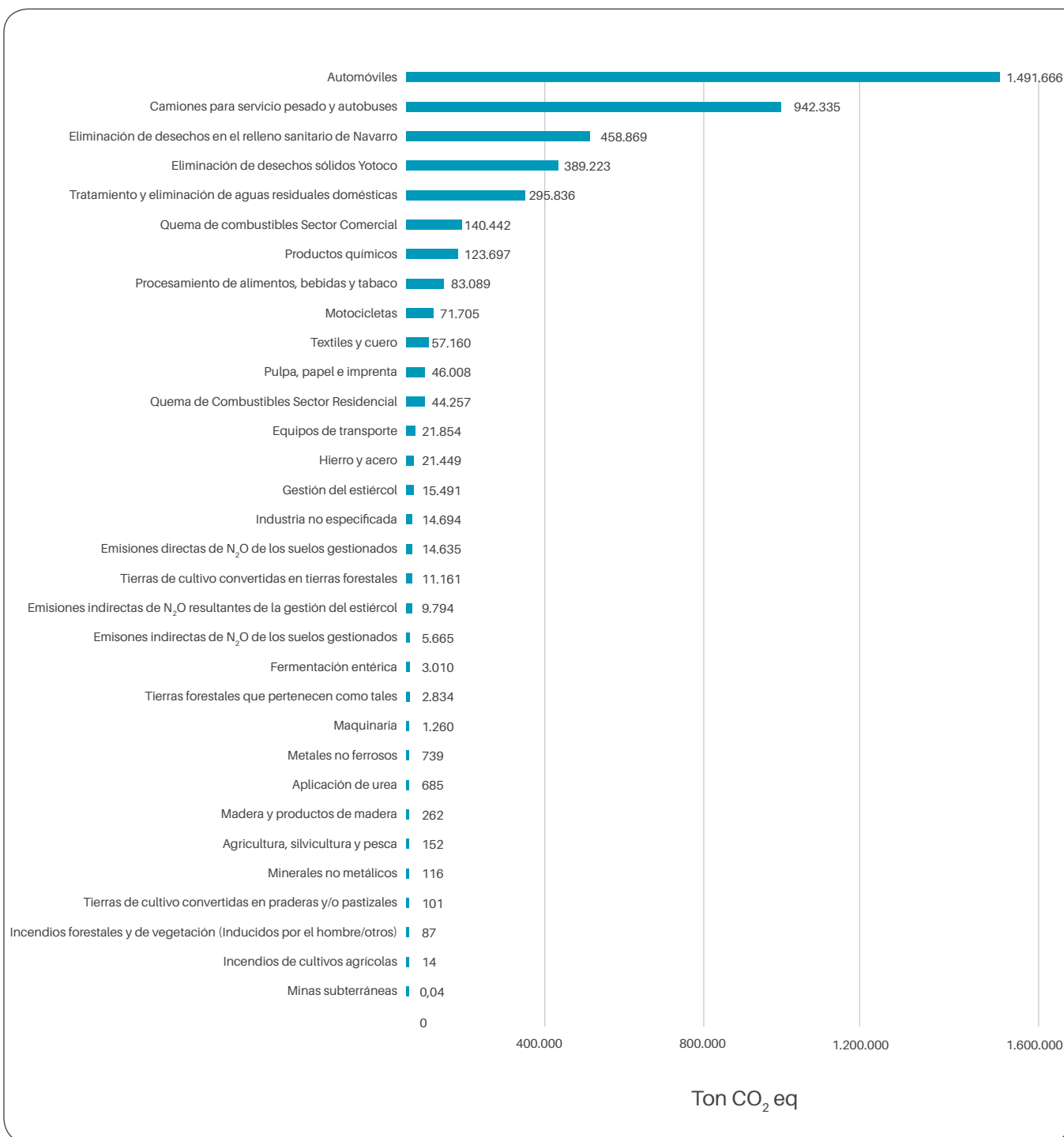


Figura 18. Categorías principales de emisiones de CO₂ eq.

Indicadores relativos de comparación

En este capítulo se pretende analizar cuál es el nivel de emisiones por unidad económica y de población, es decir, comparando las emisiones de CO₂ eq con el PIB del municipio y la población. Estos indicadores permiten realizar comparaciones relativas con otros municipios y

con los resultados de los inventarios nacionales. Los resultados reflejan que cada habitante en promedio está emitiendo 1,9 ton de CO₂ eq, y a su vez que por cada millón de pesos generado en la economía de Santiago de Cali se generan 0,182 ton de CO₂ eq.

Cuadro 7. Comparación relativa de resultados de emisiones de CO₂ eq de Cali, Buga, Palmira, Tuluá Bogotá y Colombia.

Entidad territorial	Emisiones ton CO ₂ eq	Población ^b	PIB (miles de millones de pesos)	Ton CO ₂ eq/hab	Ton CO ₂ eq/PIB
Cali	4.174.607 ^a	2.241.602	22.953 ^c	1,9	0,182
Buga	287.393 ^a	116.105	1.557 ^c	2,5	0,185
Palmira	677.754 ^a	294.580	3.689 ^c	2,3	0,184
Tuluá	208.681 ^a	193.002	2.128 ^c	1,1	0,098
Bogotá	9.169.000 ^d	7.363.782	138.379 ^e	1,2	0,066
Colombia	178.258.000	45.508.205	544.924 ^f	3,9	0,327

Fuente: ^a CIAT y CVC.
^b DANE (s.f.).
^c Garizado et al. (2014).
^d Pulido (2012).
^e DANE (2011).
^f <http://bit.ly/1TMzLts>

A continuación se puede identificar el nivel relativo de emisiones por PIB y por habitante:

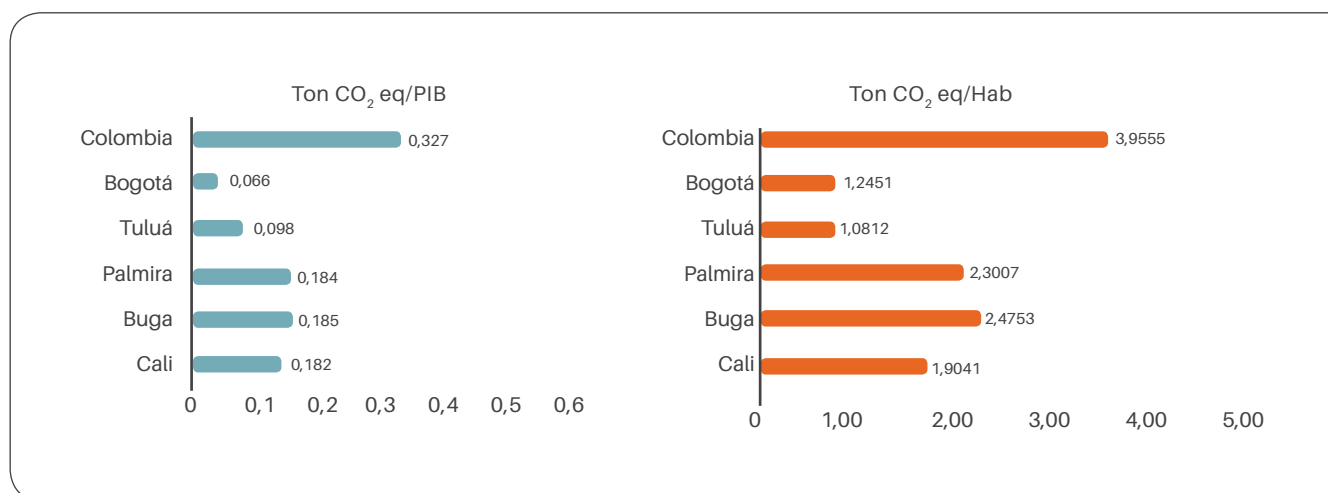


Figura 19. Toneladas de CO₂ por PIB y por habitante. Comparación entre Cali, Buga, Palmira, Tuluá, Bogotá y Colombia.

Fuente: Datos tomados del Cuadro 7.

El municipio de Cali con respecto a los otros municipios en el Valle del Cauca, en donde se han realizado inventarios de GEI en cuanto a las toneladas de CO₂ por millón de pesos generado es muy similar. Pero si comparamos a Cali con Bogotá encontramos diferencias, por ejemplo, en Cali para el período base de este inventario se generan 0,182 ton de CO₂ eq por millón de pesos generado en la economía; mientras que en Bogotá, por cada millón de pesos generado en la economía, tan solo se emitieron 0,066 ton de CO₂ eq por millón de pesos. A partir de estos resultados, podemos inferir que la economía de Cali es más carbono intensiva que la de Bogotá.

También, se evidencia que el municipio de Cali presenta menores niveles de emisiones por habitante que los municipios de Buga y Palmira. Esto se puede explicar por las altas emisiones de estos dos municipios en el sector AFOLU ocasionadas por la quema de biomasa, y aunque las emisiones de Cali, sobre todo las provenientes del sector energía son considerables, el tamaño de la población hace que este indicador de intensidad energética para Cali sea menor que en estos municipios con menor población.

Resultados emisiones de contaminantes criterio

Cuadro 8. Resultados de emisiones de contaminantes criterio para Santiago de Cali en el año 2010.

Sector	Categoría	Emisiones (ton)										
		COVDM	NH ₃	N ₂ O	NO	N ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO _x	CO	SO _x	TSP
Uso de productos	Aplicación de pintura	0,24										
	Desengrasantes	4.485										
	Lavado en seco	22										
	Manufactura de caucho	0,03										
	Manufactura de farmacéuticos	148										
	Manufactura de cinta adhesiva	10.075										
	Producción de calzado	0,00										
	Curtido de cueros		0,02									
	Imprenta	2.401										
Agricultura	Gestión de estiércol											
	Ganado lechero		20,7	0,1	0,0	0,3	0,2	0,1				
	Doble propósito		1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
	Cebas		9,4	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1				
	Porcinos menores a 6 meses		76,3	0,2	0,1	1,1	7,1	1,2				
	Porcinos mayores a 6 meses		8,63	0,03	0,0	0,12	0,71	0,12				
	Otros animales											
	Aves ponedoras		1,038	0,22			36,8	4,33				
	Pollo de engorde		915	4,16			216	29,1				
	Aves de traspato		4,27	0,00			0,75	0,14				
	Caprinos		0,28	0,00			0,00	0,00				
	Equinos		14,8	0,13			0,18	0,12				
	Mulares y asnares		0,59	0,01			0,01	0,00				
	Cultivos y uso de fertilizantes	0,00	36,61		11		10,5	0,40				
	Incendios naturales	78,02	6,71				6,8	5,6	30	843	5,9	10,5

(Continúa)

(Continuación)

Desechos	Residuos sólidos dispuestos en tierra	148,6										
	Tratamiento de aguas residuales	0,00										
Transporte	Automóviles	2.721	161,8						2.197	24.026		9,8
	Camiones para servicio pesado y autobuses	1.211	100,4						1.004	21.282		6,2
	Motocicletas	708	1,13						46,95	7.814		12,9
Manufactura y Construcción	Agricultura/silvicultura/pesca/piscifactorías	0,00					0,00	0,00	0,12	0,04	0,01	0,00
	Comercial/Institucional	0,73					0,39	0,33	18,1	6,52	1,87	0,46
	Hierro y acero	34,3					35,3	35,01	37,5	373	13,73	36,8
	Industria no especificada	0,69					0,20	0,19	18,5	6,81	0,59	0,21
	Maquinaria	0,06					0,01	0,01	1,6	0,56	0,01	0,01
	Metales no ferrosos	0,06					0,12	0,09	0,86	0,33	0,74	0,15
	Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	21,2					19,4	19,1	111	226	12,16	20,3
	Productos químicos	3,8					1,48	1,30	99,5	35,70	5,87	1,70
	Pulpa, papel e imprenta	1,56					1,09	0,89	36,4	13,17	5,80	1,32
	Textiles y cuero	26,08					34,5	31,9	72,5	281	264	36,6
	Minerales no metálicos	0,03					0,03	0,03	0,11	0,26	0,23	0,03
	Equipos de transporte	0,58					0,12	0,12	16,2	5,78	0,12	0,12
	Madera y productos de madera	0,31					0,32	0,32	0,43	3,43	0,08	0,33
	Otros sectores	0,00					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Refinación de petróleo	0,00					0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total		22.088	2.396	5	11	2	372	130	3.690	54.919	312	138

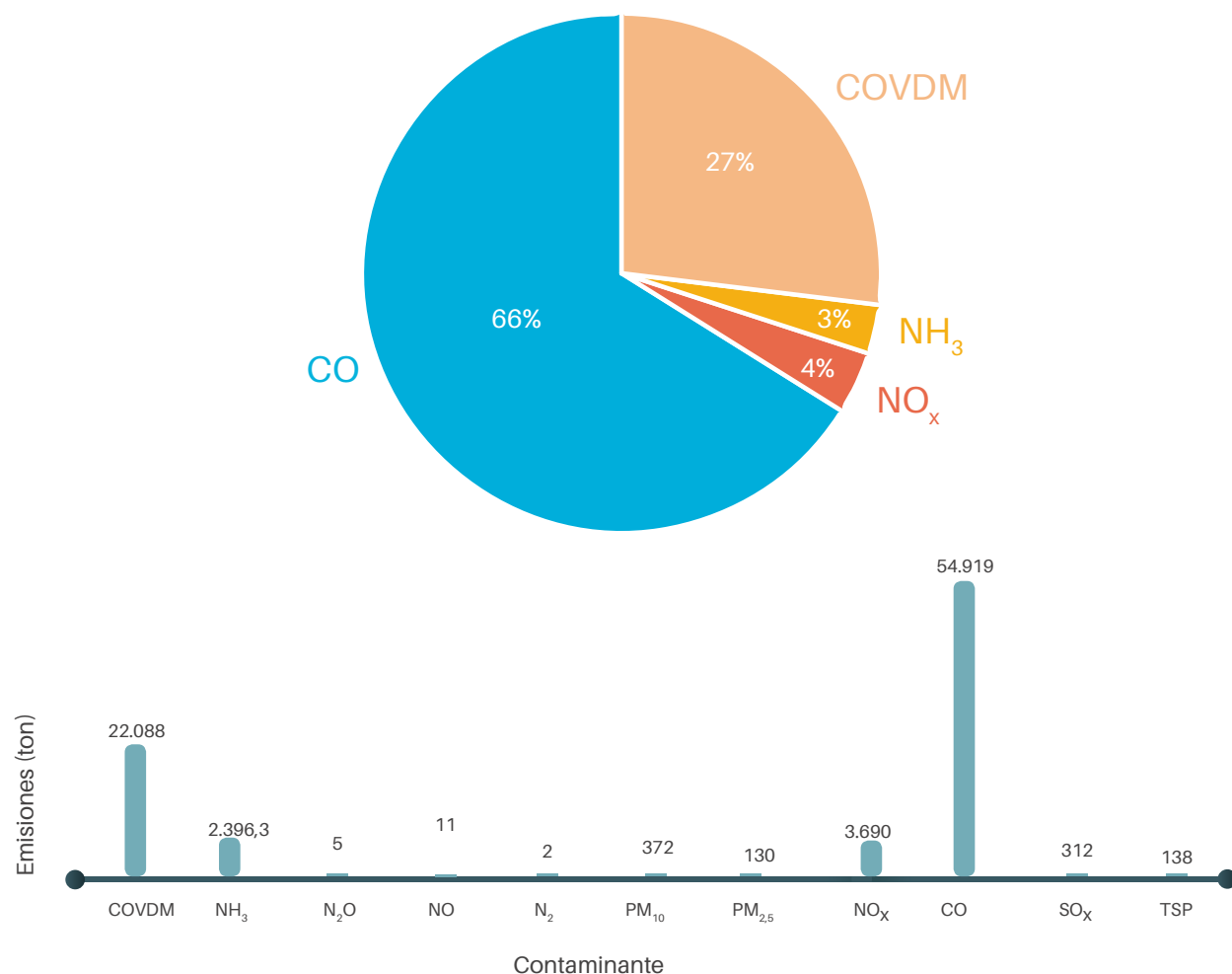


Figura 20. Participación de emisiones por contaminante criterio.

Las emisiones de contaminantes criterio en el municipio de Santiago de Cali para el año 2010 estuvieron representadas en un 66% por las referidas a monóxido de carbono equivalentes a 54.918 ton; seguido por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, diferentes del metano, representando un 27%, equivalente a 22.088 ton; sucesivo los óxidos de nitrógeno y amoníaco, representando en 4% y 3%, equivalentes a 3.690 y 2.396 ton, respectivamente; y en menor proporción se encuentran el material particulado, los óxidos de nitrógeno y azufre, que aportaron de manera conjunta el 15% de las emisiones.

Emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM)

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) fueron estimadas para diferentes sectores y actividades, entre los que se encuentran el uso de productos, la agricultura, energía, desechos, transporte, manufactura y construcción. Sin embargo, las actividades que mayor cantidad de COVDM generaron fueron: la manufactura de cinta adhesiva representando el 45,61% (10.075 ton), el uso de desengrasantes 20,30% (4.485 ton), los automóviles 12,32% (2.721 ton), el uso de tintas en las imprentas 10,87% (2.401 ton), los camiones para servicio pesado 5,48% (1.211 ton), las motocicletas 3,20% (708 ton) y el 2,20% generado por diferentes actividades en proporciones menores al 1%.

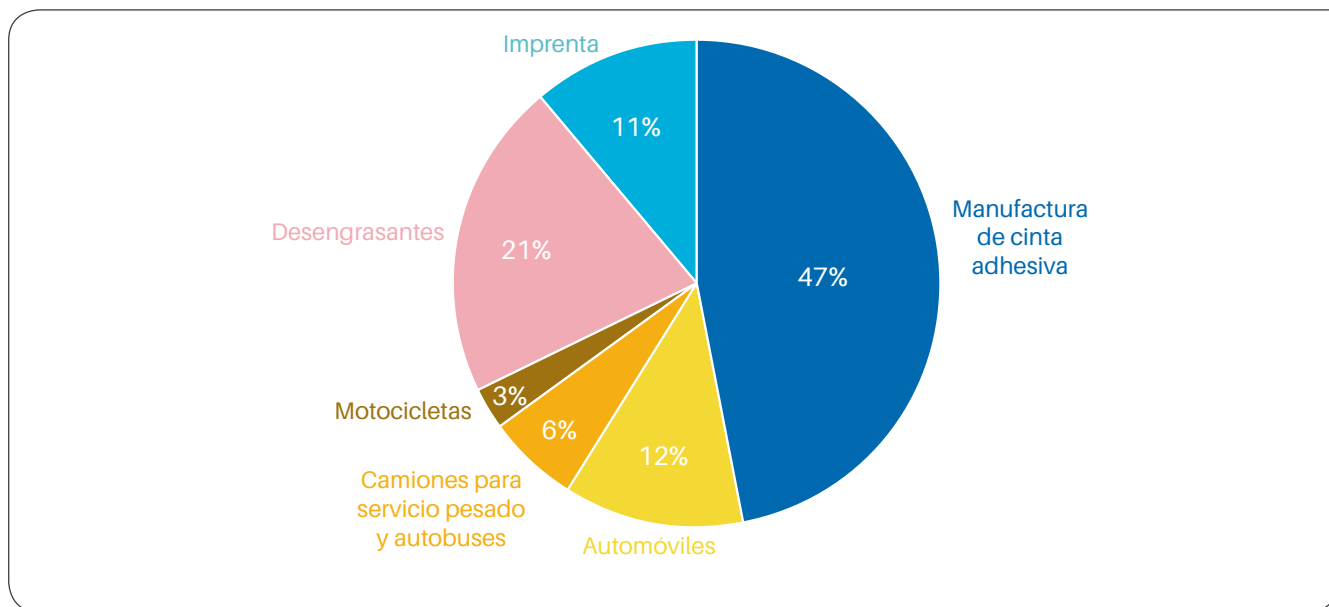


Figura 21. Actividades con mayor participación en las emisiones de COVDM.

Emisiones de amoníaco (NH_3)

La Figura 22 presenta las actividades que mayores emisiones de amoníaco generaron en Santiago de Cali para el año 2010, siendo las más representativas la gestión de estiércol de aves ponedoras y pollos de engorde, representando el 43% y 38% equivalentes a 1.038 y 914 ton, respectivamente; seguido por la categoría de transporte con la participación de automóviles y camiones para servicio pesado equivalentes al 7% y 4% con emisiones que oscilan entre 161 y 100 ton; en

menor proporción se encuentran el uso de fertilizantes en los cultivos y la gestión de estiércol de porcinos menores a 6 meses equivalentes al 1% y 3% del total; y finalmente catalogadas como otras actividades se encuentran aquellas que generaron emisiones menores al 1,5% del total con valores totales entre 0,02 y 20,7 ton. Algunos ejemplos de esta última categoría son el curtido de cueros, el uso de motocicletas, los incendios naturales y la gestión de estiércol de mulares y asnares, caprinos, aves de traspatio, equinos, cebas, porcinos mayores a 6 meses y ganado lechero.

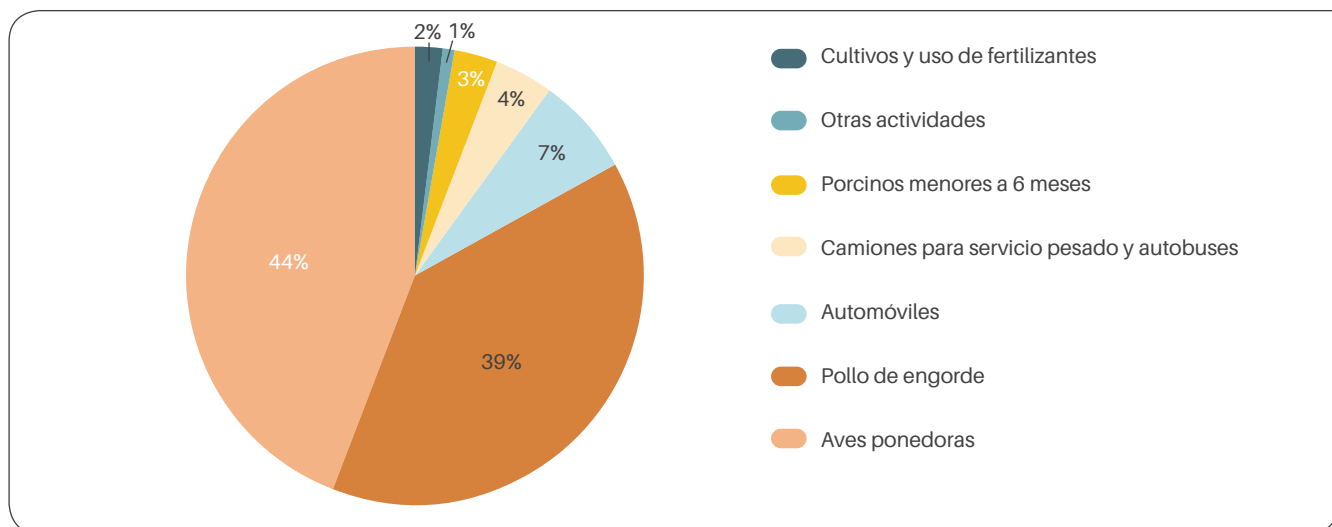


Figura 22. Actividades con mayor participación en las emisiones de NH_3 .

Emisiones de óxido nitroso (N_2O)

Las emisiones de óxido nitroso fueron generadas por la actividad relacionada con la gestión de estiércol de diferentes animales. Estas estuvieron representadas en un 84% por las generadas por los pollos de engorde con 4,16 ton, seguido en proporciones similares por las aves ponedoras y los porcinos menores a 6 meses con

emisiones de 0,22 ton, posteriormente se encuentran los equinos con un 3%, las cebas y el ganado lechero con un 2% cada uno y, finalmente con emisiones inferiores a 0,04 ton se encuentran otras especies como mulares, bovinos doble propósito, caprinos y aves de traspato.

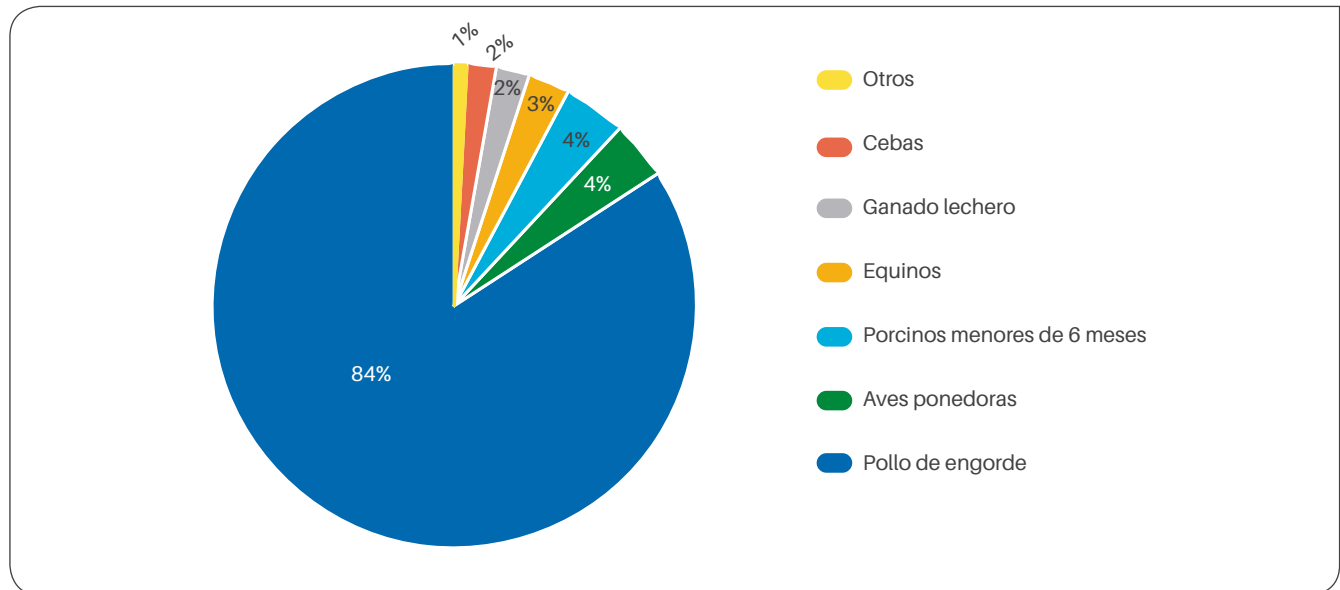


Figura 23. Actividades con mayor participación en las emisiones de N_2O .

Emisiones de monóxido de nitrógeno (NO)

En términos de monóxido de nitrógeno, se emitieron en el año 2010 en Santiago de Cali un total de 11,1 ton, correspondientes a las actividades relacionadas con la gestión de estiércol de diferentes animales y el uso de fertilizantes. Es preciso anotar que esta última actividad

fue responsable del 99,07% de las emisiones generadas durante el año de estudio. En la Figura 24, se pueden apreciar en detalle las emisiones generadas por cada categoría.

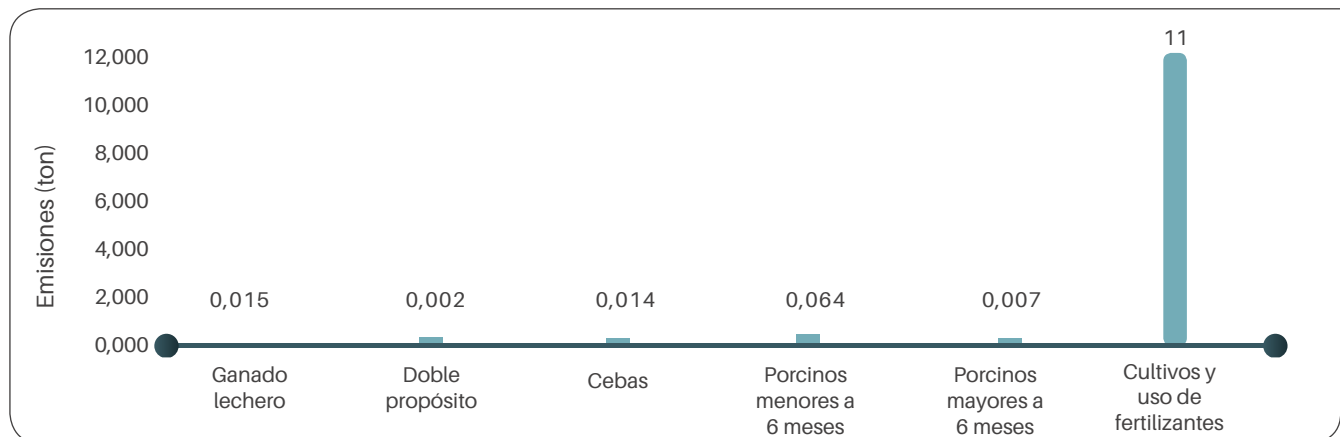


Figura 24. Emisiones de NO generadas por diferentes actividades en el municipio de Santiago de Cali.

Emisiones de nitrógeno molecular (N_2)

La Figura 25 muestra el porcentaje de participación de cada una de las actividades emisoras de nitrógeno molecular, lo cual evidencia que todas ellas están relacionadas con la gestión de estiércol, siendo la más representativa la relacionada con los porcinos menores

a 6 meses, equivalente al 64% del total (1,1 ton), seguido del ganado lechero equivalente al 17% (0,3 ton) y finalmente con un 12% y 7% se encuentran las emisiones de las cebas y los porcinos mayores a 6 meses cuyas emisiones fueron inferiores a 0,12 ton al año.

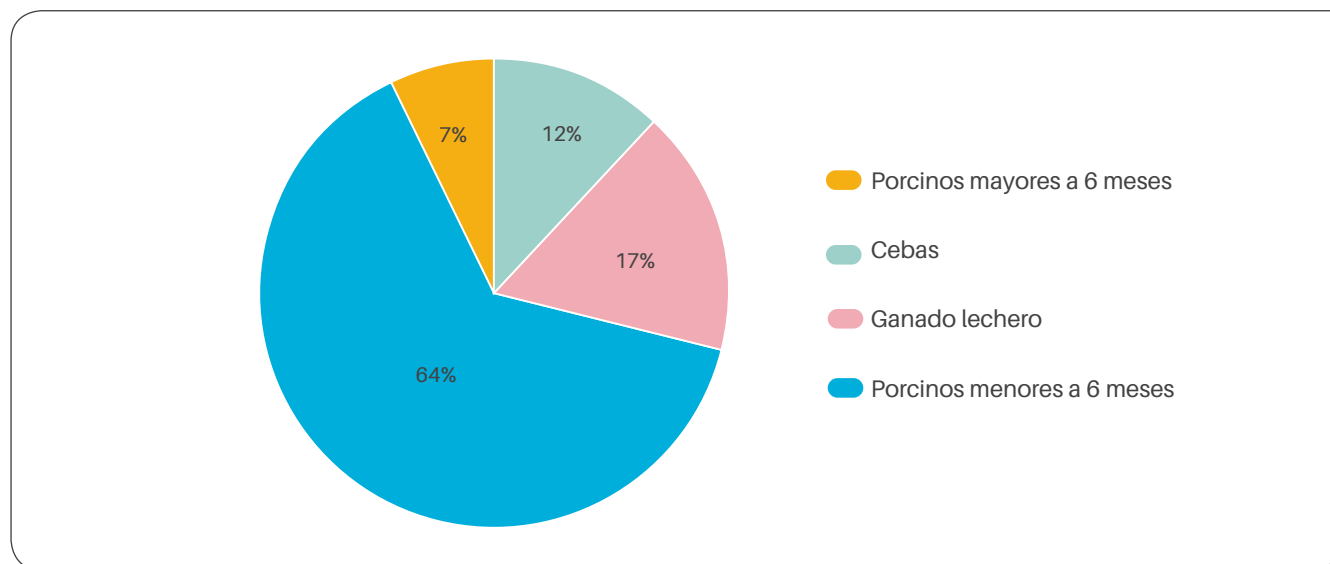


Figura 25. Actividades con mayor participación en las emisiones de N_2 .

Emisiones de material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$)

Las emisiones de material particulado de tamaño 10 y $2,5\mu m$ se generaron en el municipio de Cali en diferentes sectores, entre los que se destacan la agricultura, la manufactura y la construcción. En cuanto a emisiones de PM_{10} sobresalen actividades como la gestión de estiércol referente a los pollos de engorde, quienes representan el 58% del total; seguido con un 9% la gestión de estiércol de aves ponedoras, la manufactura de hierro, acero, cueros y textiles; en menor proporción con porcentajes de participación entre el 2 y 5% se encuentran las actividades de manufactura de productos químicos, pulpa papel e imprenta, metales no ferrosos, productos de madera y gestión de estiércol de cebas,

caprinos y bovinos doble propósito. Las emisiones más representativas se presentan en la Figura 26.

Por otra parte, las emisiones de $PM_{2,5}$ estuvieron representadas en un 27% y 24% por actividades de manufactura relacionadas con el hierro-acero y textiles-cuero, respectivamente; seguido por la gestión de estiércol de pollos de engorde y el procesamiento de alimentos y bebidas con un 22 y 15%, respectivamente. Con participaciones menores al 5% se encuentran los incendios naturales, la gestión de estiércol (porcinos menores a 6 meses, aves ponedoras, cebas, caprinos, entre otros), manufactura de productos químicos, de metales no ferrosos, de minerales metálicos y actividades de agricultura.

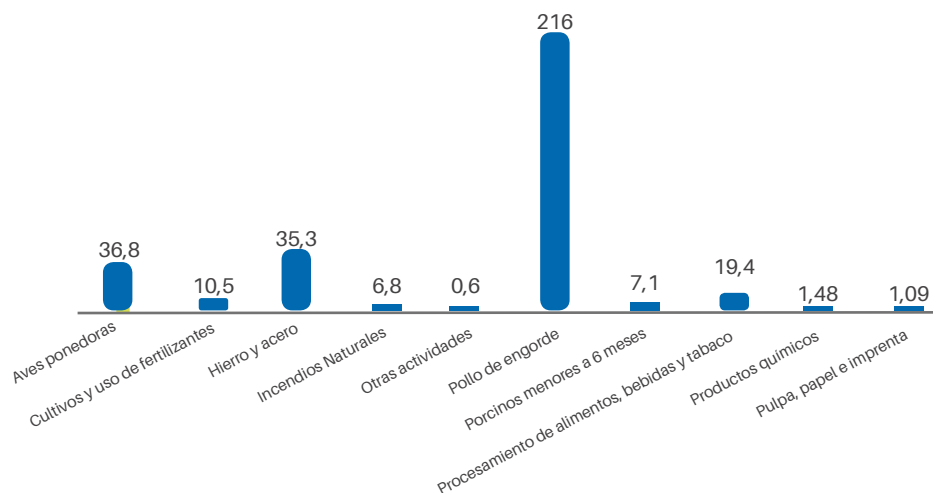


Figura 26. Emisiones de material particulado PM₁₀ generadas en el municipio de Cali.

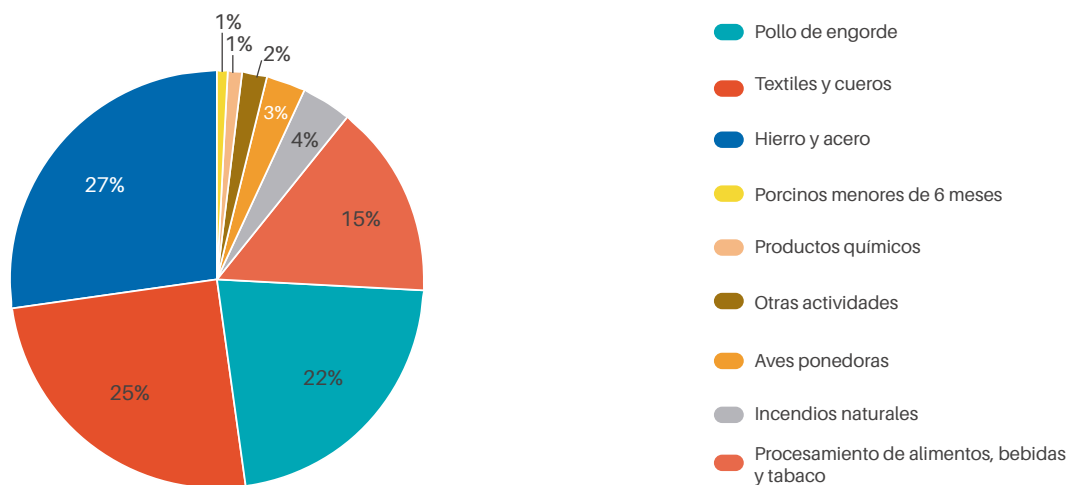


Figura 27. Actividades con mayor participación en las emisiones de PM_{2,5}.

Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x)

La Figura 28 muestra el porcentaje de participación de las actividades más representativas que generaron óxidos de nitrógeno en el municipio de Santiago de Cali en el año 2010, evidenciándose una elevada participación del sector transporte equivalente al 86%; esto referido en las categorías de automóviles (61%) y camiones

para servicio de carga pesada (28%). En este sentido el 11% restante de las emisiones fueron generadas por actividades de manufactura de productos químicos, textiles, hierro, acero, procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco, y el uso de motocicletas como medio de transporte.

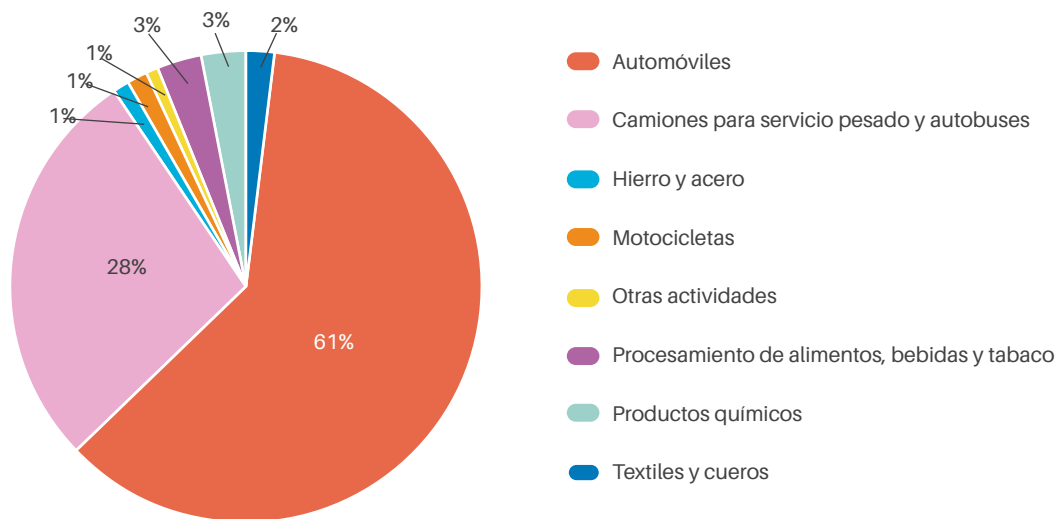


Figura 28. Actividades con mayor participación en las emisiones de óxido de nitrógeno en el municipio de Cali.

Emisiones de monóxido de carbono (CO)

Las emisiones de monóxido de carbono estuvieron representadas especialmente por las actividades relacionadas con el transporte de automóviles, camiones para carga pesada y motocicletas con emisiones que oscilaron entre 24.026 y 7.814 ton, dichas categorías

representan en orden consecutivo el 44% y 14% de las emisiones generadas. En menor cantidad con 843 ton se encuentran los incendios naturales y con 72,6 ton otras actividades relacionadas con la manufactura de productos. Dicha información puede ser apreciada en la Figura 29.

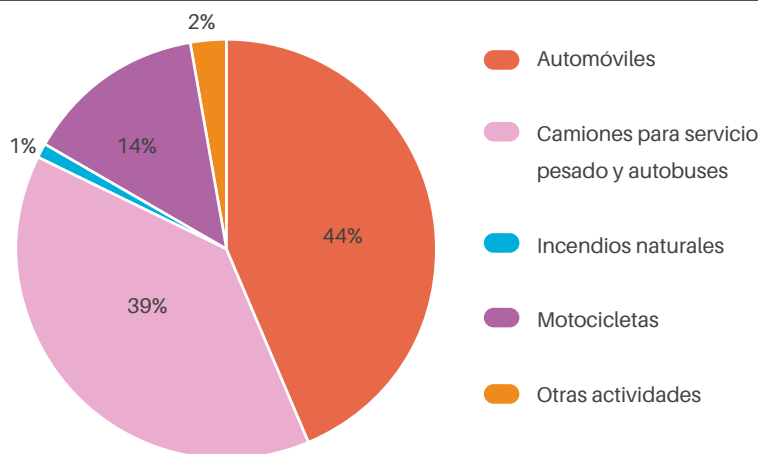


Figura 29. Actividades con mayor participación en las emisiones de monóxido de carbono generadas en el municipio de Cali.

Emisiones de óxidos de azufre (SO_x)

Las emisiones de óxido de azufre en el municipio fueron generadas por el sector de manufactura y construcción. En este sentido podemos ver en la Figura 30 la participación total y representativa de dichas actividades; siendo la más importante la relacionada con textiles y cuero equivalente al 81% (264 ton);

también se encuentran actividades como: hierro y acero (13,73 ton), procesamiento de alimentos y bebidas (12,16 ton), incendios naturales (5,9 ton), productos químicos (5,8 ton), pulpa y papel (5,8 ton), el sector comercial (1,87 ton) y con emisiones menos representativas la manufactura de madera, metales no ferrosos, los minerales no metálicos, entre otros.

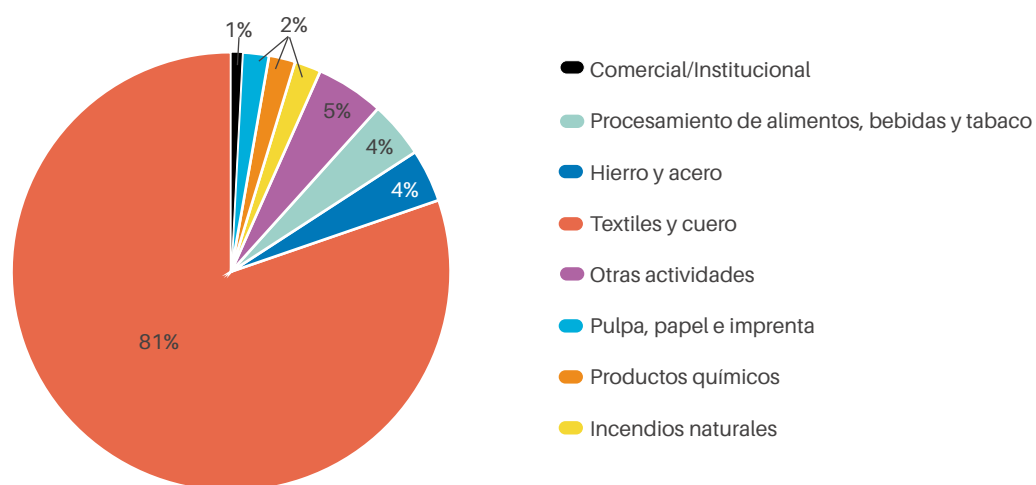


Figura 30. Actividades con mayor participación en las emisiones de SO_x .

Emisiones de partículas totales suspendidas

La Figura 31 muestra la participación de las actividades relacionadas con el transporte, la manufactura y construcción, que generaron mayores cantidades de partículas totales suspendidas. Sobresaliendo con un 24% y 23% la manufactura de hierro-acero y textiles-cuero, respectivamente; seguido por el procesamiento

de alimentos y bebidas, representando el 15% del total. Continuo a estas actividades se encuentran los incendios forestales con un 8%, el uso de motocicletas, automóviles y camiones equivalentes al 9%, 7% y 5%, respectivamente. En menores proporciones de participación se encuentran la manufactura de productos químicos, de pulpa, papel e imprenta, el uso de maquinarias y los equipos de transporte.

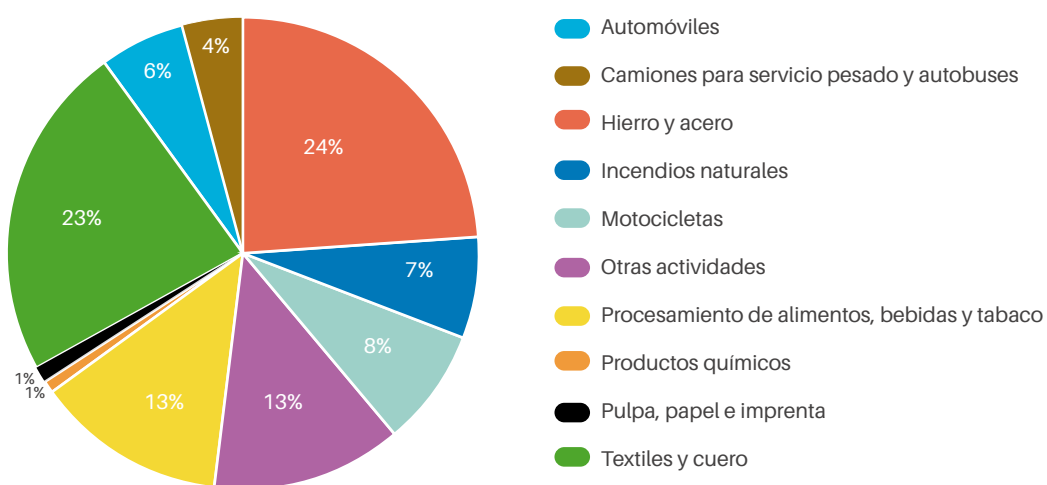


Figura 31. Actividades con mayor participación en las emisiones de partículas totales suspendidas.

Conclusiones

El cálculo de las emisiones de GEI, mediante metodologías homologables y comparables con resultados regionales y locales, como es la metodología IPCC, permite al municipio de Santiago de Cali hacer un balance del nivel de emisiones de GEI e identificar los sectores más carbono intensivos; a su vez, la incorporación de la metodología EMEP/CORINAIR permite identificar emisiones de contaminantes criterio, que aunque no influyen de manera directa a la hora de medir GEI, son fundamentales para evaluar la calidad del aire y los potenciales problemas de salud pública.

La articulación de este inventario con la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono (EMDBC) y el Plan de Adaptación y Mitigación para Santiago de Cali es clave para el ordenamiento y la planificación del territorio, teniendo en cuenta el cambio climático, y no sólo hacer del municipio un lugar más resiliente, sino también aportar de manera directa al compromiso que ha adquirido Colombia frente a la CMNUCC, en diciembre de 2015 en París, de reducción del 20% de las emisiones totales nacionales de CO₂ eq.

En cuanto a resultados, Cali está emitiendo un total de **4.174.608** ton de CO₂ eq, considerando los sectores agregados por el IPCC: Energía, AFOLU y Desechos; de los cuales como era de esperarse para el caso particular de ciudades con alto grado de urbanización, el sector energía representa un poco más del 71% sobre el total de las emisiones, el cual en gran parte está determinado por el parque automotor con un 60% del total de las emisiones. A su vez, los residuos que generan los más de 2,3 millones de habitantes se ven reflejados en las emisiones de Desechos, los cuales incluyen las emisiones en los rellenos sanitarios y el tratamiento de

aguas residuales, este sector representa un poco más del 27%. Asimismo el sector AFOLU, que incluye todos los procesos asociados al Ganado, la tierra y las fuentes agregadas, representa tan sólo el 1,5% del total de las emisiones.

En cuanto al cálculo de contaminantes criterio tenemos que los sectores con mayor cantidad de emisiones para el año de estudio fueron los relacionados a la manufactura de diversos productos y la agricultura; sin embargo, sus emisiones fueron pequeñas en comparación a las generadas por el uso de diferentes medios de transporte como automóviles y motocicletas. El monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles fueron los contaminantes que en mayor proporción se generaron en el año 2010, debido a procesos productivos industriales. Es preciso entonces enfocar las acciones a medidas o tecnologías más eficientes que disminuyan o eliminen por completo la producción de dichos contaminantes.

Todos estos resultados marcan una línea de trabajo clara frente a las estrategias o acciones de mitigación y adaptación que se deben adelantar, teniendo como pilar fundamental procesos de integración institucional, en donde confluyan el sector privado, público, y la comunidad en general. En ese sentido, La Red Interinstitucional de Cambio Climático del Valle del Cauca y el Nodo Regional de Cambio Climático del Pacífico liderados por la CVC seguirán desempeñando un rol fundamental en este camino, para hacer de Cali un municipio más resiliente y con mayor capacidad de adaptación frente a los efectos del cambio climático y la variabilidad climática.

Anexos

Anexo A. Metodología empleada en el cálculo de emisiones de GEI

Metodología para estimar las emisiones de GEI en Santiago de Cali en los sectores energía, AFOLU y desechos.

Energía

El sector energía en los inventarios es el sector más relevante debido a que, para la mayoría de las economías, los sistemas de energía se mueven por la combustión de los combustibles fósiles. Durante la combustión, el carbono y el hidrógeno de los combustibles fósiles se convierten principalmente en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), que liberan la energía química del combustible en forma de calor. En general, se utiliza este calor directamente (con cierta pérdida por conversión) para producir energía mecánica, muchas veces para generar electricidad o para el transporte (IPCC, 2006, vol. 2).

A su vez, según el IPCC (2006) este sector comprende principalmente:

- La exploración y explotación de las fuentes primarias de energía.
- La conversión de las fuentes primarias de energía en formas más utilizables en refinerías y centrales eléctricas.
- La transmisión y distribución de los combustibles.
- El uso de combustibles en aplicaciones estacionarias y móviles. Las emisiones surgen de estas actividades por combustión y como emisiones fugitivas, o por escape sin combustión.

Estructura de análisis para estimar los GEI en el sector energía

Las estimaciones en el sector energía tienen varias consideraciones de tipo metodológico que valen la pena mencionar. Es por ello que en la Figura A1.1 se pretende mostrar las diferentes fuentes de emisiones, las cuales están determinadas por unas categorías y subcategorías, que aplican dependiendo del municipio, región o país en donde se realice el inventario de GEI.

Según las guías IPCC 2006, existen tres niveles para estimar las emisiones provenientes de la quema de combustible fósil.

Nivel I. Dicho método se basa en el consumo de cada uno de los tipos de combustibles quemados y se tienen en cuenta factores de emisión por defecto del IPCC. La calidad de estos factores de emisión difiere de un gas a otro. Para el caso del CO_2 , los factores de emisión dependen principalmente del contenido de carbono del combustible. Las condiciones de combustión (eficacia, carbono retenido en la escoria y las cenizas, etc.) tienen poca importancia relativa. Por lo tanto, es posible estimar las emisiones de CO_2 con bastante exactitud sobre la base del total de los combustibles quemados y del contenido de carbono promediado de los combustibles. Mientras que los factores de emisión correspondientes al metano y al óxido nitroso dependen de la tecnología de combustión y de las condiciones del proceso, y varían significativamente, tanto entre las instalaciones individuales de combustión como a través del tiempo. Debido a esta variabilidad, el uso de factores de emisión promediados para estos gases, que deben justificar una gran variabilidad en las condiciones tecnológicas, aporta incertidumbres bastante considerables.

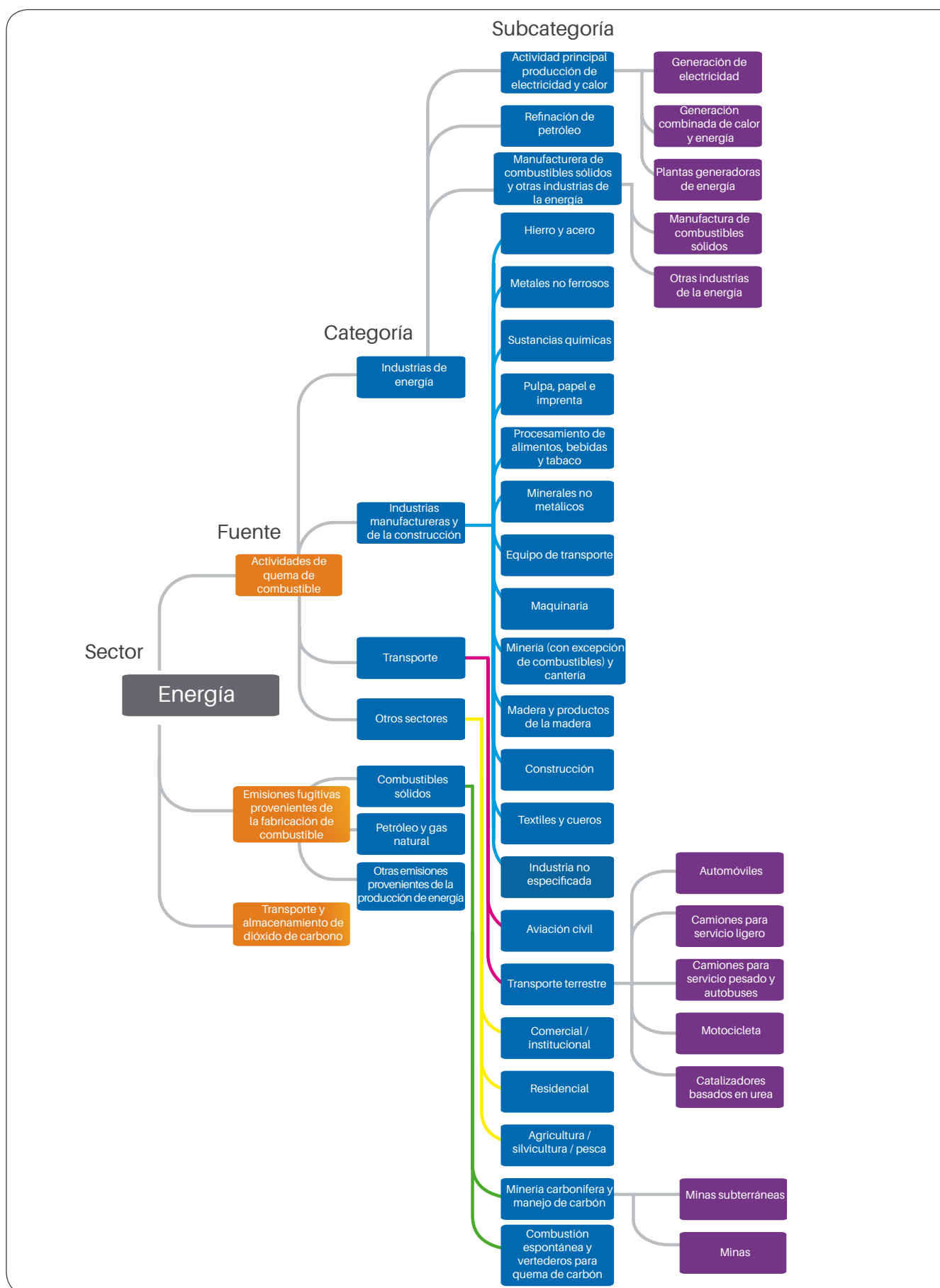


Figura A1.1. Estructura de análisis para estimar los GEI en el sector Energía.

Nivel II. En este nivel se estiman las emisiones de la combustión a partir de estadísticas similares de combustible, como las utilizadas en el método del Nivel I; sin embargo, se utilizan factores de emisión específicos del país o la región en lugar de los factores por defecto de dicho nivel.

Puesto que los factores de emisión específicos del país o región que estén disponibles pueden diferir para cada combustible, tecnología de combustión o incluso para cada planta, pueden desagregarse aún más los datos de la actividad, de modo que reflejen correctamente dichas fuentes desagregadas.

Si, de hecho, estos factores de emisión específicos se derivan de los datos detallados relativos al contenido de carbono de diferentes lotes de combustibles utilizados o de una información más detallada acerca de las tecnologías de combustión aplicadas, las incertidumbres de la estimación deben disminuir, y es posible estimar mejor las tendencias a través del tiempo.

Nivel III. En este nivel de estimación, básicamente se utilizan modelos detallados de emisión, o lo que comúnmente conocemos como mediciones *in situ*. Es claro que este tipo de mediciones arrojan mejores estimaciones y con menor incertidumbre; sin embargo, los costos económicos para realizar mediciones puntuales pueden ser muy elevados. Este tipo de mediciones también arrojan información detallada de contaminantes criterio tales como SO_2 y el NO_x , entre otros. Que sin duda permiten tomar decisiones puntuales entorno a la calidad del aire y la salud pública. Según el IPCC 2006, para estimar CO_2 derivado de la quema de combustibles en el sector transporte basta con conocer la cantidad y el tipo de combustible

consumido en el parque automotor, es decir mediante el Nivel I.

Si consideramos que el CO_2 es el gas que más aporta al total de los GEI tanto nacionales como mundiales, y además el sector transporte es el que más aporta a las emisiones en Cali, este método brinda un buen acercamiento a las emisiones de CO_2 en el municipio.

Emisiones de CO_2 , CH_4 , NO_2 para cada tipo de combustible.

La Ecuación A1.1 general resume el cálculo de emisiones de CO_2 eq por quema de combustibles fósiles es la siguiente:

Ecuación A1.1

Emisiones de $\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{NO}_2 = (\sum (\text{Cons. Actividad} * \text{F.cons.} * \text{F.Em.} * 10^{-3}))$

Donde:

Cons.Actividad= Consumo aparente de combustible por actividad productiva (m^3 , TCal, J, MJ, GJ, TJ).

F.cons= Factor de conversión a una unidad común de energía (TJ).

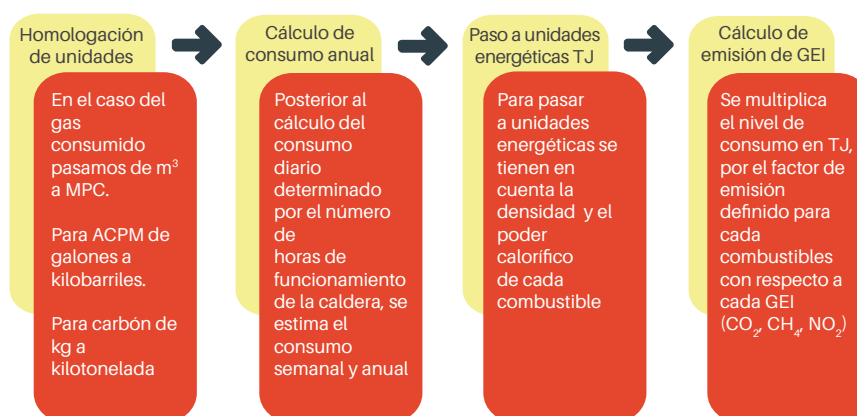
F.Em.= Factor de emisión para obtener el contenido de carbono (kg/TJ).

10^{-3} = Constante para convertir t de carbono a Gg de carbono (en este caso no aplica, todo fue dejado en ton).

Cada combustible tiene un nivel de emisiones diferente a nivel de CO_2 , CH_4 y NO_2 , este punto será aclarado a continuación.

Para la estimación puntual en el sector energía, se realizan los siguientes pasos:

Figura A1.2. Pasos para la estimación de emisiones GEI en el sector Energía.



Los factores de emisión utilizados en este sector provienen tanto del IPCC como de la UPME adscrita al Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Lo cual

implicó que, para casos específicos, las estimaciones fueran realizadas mediante Tier 2. Los FE usados fueron los siguientes:

Cuadro A1.1. Factores de emisión por defecto.

Combustible usado en la industria manufacturera	CO ₂	CH ₄ *	NO ₂ *
Consumo de gas natural	55.103 kg CO ₂ /TJ	5 kg CH ₄ /TJ	0,1 kg N ₂ O /TJ
Consumo de ACPM	74.893 kg CO ₂ /TJ	3 kg CH ₄ /TJ	0,6 kg N ₂ O /TJ
Consumo de carbón*	94.600 CO ₂ /TJ*	10 kg CH ₄ /TJ	1,5 kg N ₂ O /TJ
Consumo de GLP	65.527 CO ₂ /TJ	5 kg CH ₄ /TJ	0,1 kg N ₂ O /TJ
Consumo de madera	80.921 CO ₂ /TJ	30 kg CH ₄ /TJ	4 kg N ₂ O /TJ
Consumo de gasolina	74.594 CO ₂ /TJ	3 kg CH ₄ /TJ	0,6 kg N ₂ O /TJ

Fuente: UPME(2010) * IPCC (2006).

El único FE de CO₂ tomado por defecto del IPCC es el de consumo de carbón, el resto provienen de la UPME para el caso de CO₂.

Cuadro A1.2. Consumo por tipo de combustible en el sector manufacturero en 2010.

Combustible usado en la industria manufacturera	Unidad Año 2010	Fuente de información
Consumo de gas natural	127.211.783 m ³	Empresa de servicios públicos Gases de Occidente S.A. y DAGMA
Consumo de ACPM	931.832 Gal	DAGMA
Consumo de carbón	11.113.737 Kg	DAGMA
Consumo de GLP	410.660 Kg	DAGMA
Consumo de madera	25.906 m ³	DAGMA
Consumo de gasolina	73,9 Gl	DAGMA

Fuente: Elaboración con base en datos del DAGMA y la Universidad Autónoma de Occidente (2013).

Cuadro A1.3. Consumo de combustibles por tipo de sector. Homologados según los códigos de Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) reportados en la base de datos de DAGMA en los sectores determinados por el IPCC.

Sector	ACPM	Carbón	Gas	Gas propano	Madera
	KB/año	Kiloton/año	MPC/año	Kilobarr/año	m³/año
Agricultura/silvicultura/pesca/piscifactorías	0,089698	--	1,53166	--	--
Comercial/Institucional	12,52942	--	240,6192	0,009521	--
Equipos de transporte	--	--	230,3373	0,925395	--
Hierro y acero	5,530715	4,538514	19,99842	1,642002	230,852
Industria no especificada	1,712578	0,246214	257,6594	2,915602	--
Madera y productos de madera	--	--	1,644919	--	2,121801
Maquinaria	0,000758	--	22,59674	--	--
Metales no ferrosos	5,286831	--	4,726849	0,044826	--
Minerales no metálicos	--	0,256937	0,958165	--	--
Otros sectores	--	--	0,00239	--	--
Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	26,29473	3,650866	1290,222	0,642028	118,4248
Productos químicos	37,01293	--	1336,542	32,29156	--
Pulpa, papel e imprenta	39,74441	--	462,7939	0,443993	--
Refinación de petróleo	--	--	0,177343	--	--
Textiles y cuero	0,035841	293,6011	310,4738	--	--

Fuente: Elaboración con base en los datos del DAGMA.

Los datos de consumo de gas natural domiciliario y comercial fueron extraídos de la base de datos del Sistema Único de Información de Servicios Públicos, la

cual contiene los reportes de Gases de Occidente para el caso de Santiago de Cali.

Cuadro A1.4. Datos de consumo gas natural – Sector residencial y comercial.

Variable	Cantidad
Consumo de gas natural - Sector residencial	64.300.462 m³
Consumo de gas natural - Sector comercial	24.267.065 m³

Fuente: Empresa de Servicios Públicos Gases de Occidente S.A. (2015), a través del Sistema Único de Información (SUI) (<http://bit.ly/1KnzWsP>).

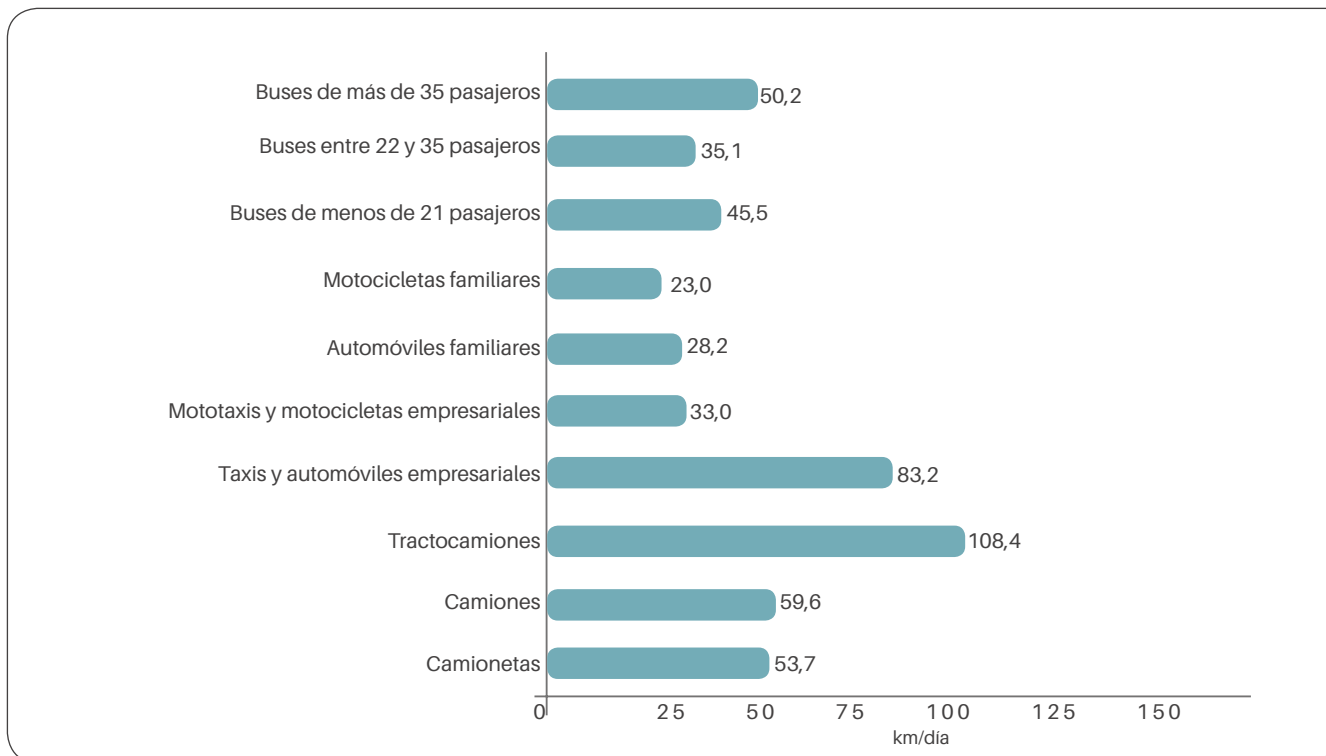


Figura A1.3. Distancia típica recorrida según modos de transporte de servicio intermunicipal en Colombia en el año 2009.

Fuente: UPME (2010).

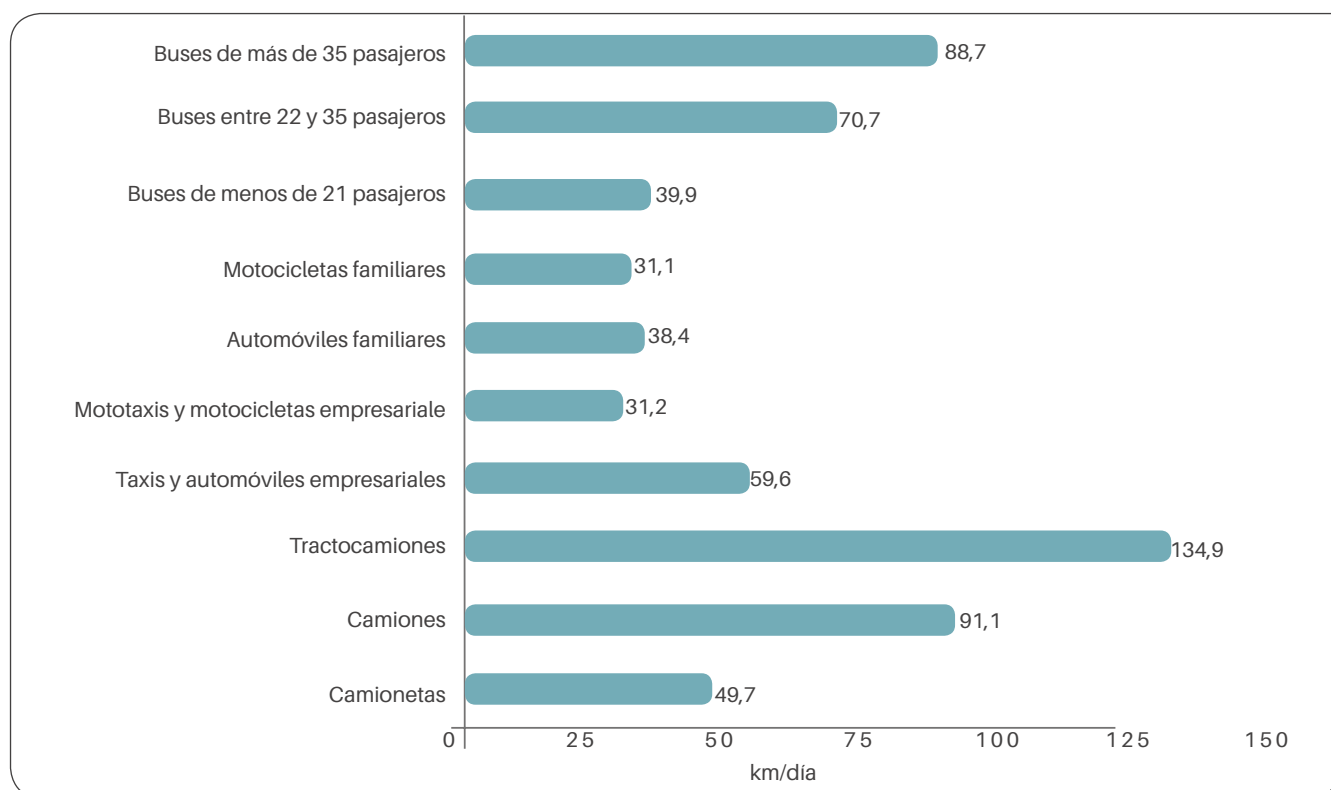


Figura A1.4. Distancia típica recorrida según modos de transporte de servicio metropolitano.

Fuente: UPME (2010).

AFOLU

A continuación se describe el proceso metodológico empleado para cuantificar las emisiones de GEI en el sector AFOLU. Según el IPCC (2006, vol. 4) en este sector las emisiones de GEI tienen lugar específicamente

en tres tipos de fuentes: i) Ganado, ii) Tierra y iii) Fuentes agregadas y de emisión no CO₂ en la tierra, los cuales se presentan a continuación en la Figura A1.5 de manera desagregada.

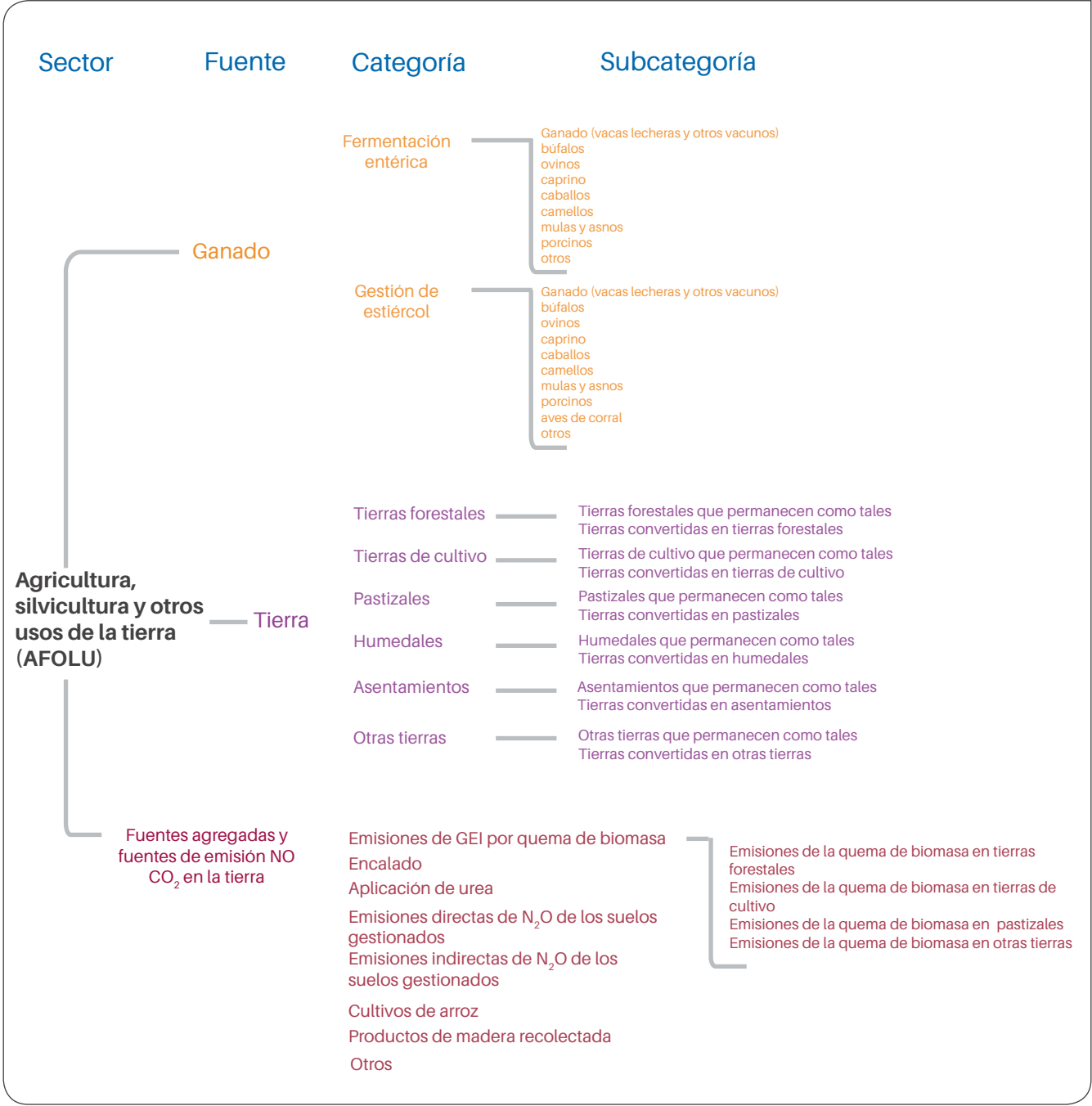


Figura A1.5. Estructura para la declaración de emisiones de GEI en el sector AFOLU.

Los GEI cuantificados en este sector fueron dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄); las emisiones de CO₂ se asociaron principalmente a procesos de respiración, descomposición y combustión de materia orgánica, mientras que las emisiones de N₂O y CH₄ a procesos de nitrificación-desnitrificación, y metanogénesis en condiciones anaerobias en suelos, depósitos de estiércol, fermentación entérica y quemado de la materia orgánica.

La metodología empleada en este sector se basó en la recopilación de información básica, procesamiento de datos y resultados consolidados de las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄. Durante la recolección de información, se indagó en instituciones como la Gobernación del Valle del Cauca, la CVC, el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entre otras, para acceder a información relacionada con la producción agrícola y pecuaria, cobertura y uso del suelo, y quema de residuos agrícolas en Cali durante 2010.

A través de la Gobernación se consiguió información detallada de las Evaluaciones Agrícolas y Pecuarias (EVAS) en el municipio de Cali entre el 2000 y 2013. Las EVAS mostraron información relacionada con el área sembrada y cosechada de distintos cultivos según su ciclo de producción (transitorios y permanentes); mientras que las Evaluaciones Pecuarias proporcionaron datos sobre la cantidad y tipo de especies (bovinos, porcinos y avícola, entre otros) de acuerdo a su raza, tipo

de explotación y ciclo de producción. Mediante las guías de costos agrícolas se pudo dar cuenta de la cantidad de insumos (abono orgánico y fertilizantes sintéticos) requeridos en cultivos de caña de azúcar, café, plátano y yuca, entre otros.

Entidades como el IGAC y la CVC proporcionaron información relacionada con la cobertura y uso del suelo para el Valle del Cauca en los años 2006 y 2010, respectivamente. En la información entregada por estas dos entidades, se logró conocer específicamente para Cali las superficies construidas, plantadas y naturales (cobertura); y las superficies en donde el sector urbano, agrícola, protección y conservación hacen uso del suelo.

A través de CENICAÑA y la CVC se obtuvo información relacionada con las actividades de quema de caña en distintos municipios del Valle del Cauca (Tuluá, Buga, Palmira, Cali) entre 2013 y 2015. Respecto a Cali, se recopiló información referente al número de eventos y hectáreas de caña quemada, proporción de residuo y materia seca, entre otras variables de interés.

Teniendo en cuenta la información recolectada de las distintas entidades mencionadas, se procedió a definir, de acuerdo con las directrices del IPCC (2006, vol. 4), el tipo de GEI emitido por cada una de las categorías mencionadas en la Figura A1.5. Esta información se muestra en el Cuadro A1.5; en ella se presenta explícitamente el vínculo entre categoría, tipo de contaminante y método de estimación.

Cuadro A1.5. Relación entre categoría de emisión, tipo de contaminante y método de estimación.

Categoría	Tipo de contaminante		Método de estimación
	Gas de efecto invernadero	Precusores	
Fermentación entérica	CH ₄	-	Nivel I
Gestión de estiércol	CH ₄	-	Nivel I
Tierras forestales	CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	NO _x , CO, COV y SO _x	Nivel I
Tierras de cultivo	CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	NO _x , CO, COV y SO _x	Nivel I
Pastizales	CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	NO _x , CO, COV y SO _x	Nivel I
Humedales	CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	NO _x , CO, COV y SO _x	Nivel I
Emisiones de GEI por quema de biomasa	CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	-	Nivel I
Encalado	CO ₂	-	Nivel I
Aplicación de urea	CO ₂	-	Nivel I
Emisiones directas de N ₂ O de suelos gestionados	N ₂ O	-	Nivel I
Emisiones indirectas de N ₂ O de suelos gestionados	N ₂ O	-	Nivel I

Emisiones de metano (CH₄) por procesos de fermentación entérica

Para cuantificar las emisiones de metano en la categoría de fermentación entérica, se tomó inicialmente la información proporcionada por la Gobernación del Valle en relación a la caracterización del sector pecuario en el municipio de Cali para 2010, y se ajustó a cada una de las metodologías de cálculo (Nivel I y II) descritas en las directrices del IPCC (2006, vol. 4).

En la metodología de Nivel I, se emplearon factores de emisión por defecto del IPCC (2006, vol. 4), mientras que en la de Nivel II se aplicaron los factores de emisión generados por el IDEAM y PNUD (2012a) y se asociaron a cada una de las categorías de ganado identificadas en el sector pecuario de Cali, tal como se muestra en el Cuadro A1.6.

Cuadro A1.6. Información general para estimar las emisiones de CH₄ mediante una metodología de Nivel I y II.

Categoría de ganado (T)	Población (N)	Factor de emisión (kg CH ₄ .Año ⁻¹ .Cabeza ⁻¹)	Nivel de estimación	Referencia
Lechero	882	84.623	Nivel II	IDEAM (2012) (IDEAM y PNUD, 2012a)
Ceba	721	53.051	Nivel II	
Caprino	200	5	Nivel I	IPCC (2006, vol. 4)
Equinos	1000	18	Nivel I	
Mulas y asnos	40	10	Nivel I	
Porcinos	9420	1	Nivel I	

Fuente: IPCC (2006, vol. 4) y Gobernación del Valle (2010).

Posteriormente se tomaron los datos o la información del Cuadro A1.6 y se operaron de acuerdo a la Ecuación A1.2 para determinar las emisiones de CH₄, como se muestra a continuación:

Ecuación A1.2

$$CH_{4 \text{ Fermentación}} = \sum_{(T)} \frac{(FE_{(T)} * N_{(T)})}{10^6}$$

Donde:

CH_{4 Fermentación} = emisiones de CH₄ por fermentación entérica (Gg CH₄.Año⁻¹)

FE_(T) = factor de emisión para la población de ganado definida (kg CH₄. Cabeza⁻¹.año⁻¹)

N_T = cantidad de cabezas de ganado de la especie o categoría T en Cali

(T) = especie o categoría de ganado

Para la categoría de ganado lechero y no lechero se emplearon los factores de emisión del IDEAM (2012) porque reflejan las condiciones productivas (la energía bruta, peso, producción y contenido de grasa en la leche) y ambientales (humedad, temperatura, precipitación etc.) en las que se da la explotación de ganado a nivel

nacional. Y en cuanto a las especies caprino, equinos, mulas y asnos, y porcinos se utilizaron los factores de emisión del IPCC (2006, vol. 4) debido a que aún no se han establecido factores de emisión a nivel nacional o departamental como para tener una mejor aproximación de las emisiones de CH₄ generadas por estas especies.

Emisiones de metano (CH₄) por la gestión de estiércol

La forma como se cuantificaron las emisiones de CH₄ en la categoría de gestión de estiércol se sustentó básicamente en las directrices del IPCC (2006, vol. 4) mediante una metodología de cálculo de Nivel I, donde se emplearon factores de emisión por defecto y datos de la población pecuaria (vacas lecheras, búfalo, ovinos, equinos y aves de corral entre otros) presente en Cali durante el 2010.

De acuerdo con el IPCC (2006, vol. 4), para estimar las emisiones de CH₄ mediante una metodología de cálculo de Nivel I, solo se requieren datos de la población de ganado por categoría de animal y temperatura de la región en cuestión, en combinación con los factores de

emisión por defecto. Por esta razón, en el cálculo de las emisiones de CH₄ provenientes del manejo del estiércol, se caracterizó la población de ganado en función de su

ubicación con tres zonas climáticas (Ver Cuadro A1.7) debido a que cada una de ellas se encuentra asociada a un factor de emisión determinado.

Cuadro A1.7. Factores de emisión de la gestión del estiércol en países en vía de desarrollo por temperatura para ganado bovino, caprinos, camélidos, equinos, mulas y asnos, y aves de corral.

Ganado	Factor de emisión de CH ₄ según la temperatura promedio anual (°C)		
	Fría (< 15 °C)	Templada (15 a 25 °C)	Cálida (> 25 °C)
Caprinos	0,11	0,17	0,22
Camélidos	1,28	1,92	2,56
Equinos	1,09	1,64	2,19
Mulas y asnos	0,60	0,90	1,20
Aves de corral	0,01	0,02	0,02

Fuente: IPCC (2006).

En este sentido, se recopiló información de la temperatura anual promedio en Cali durante el año 2010 para seleccionar el factor de emisión por defecto más adecuado, ya que entre las directrices del IPCC (2006, vol. 4) se recomienda precisamente elegir un factor de emisión que se ajuste lo más posible a las

características propias del lugar donde se practica el inventario. Como resultado de esta búsqueda de información se encontró que en 2010 el municipio presentó una temperatura anual promedio de 23,6 °C y por tal motivo de seleccionaron los factores de emisión que se presentan en el Cuadro A1.8.

Cuadro A1.8. Información general para estimar las emisiones de CH₄.

Ganado (T)	Población (N)	Factor de emisión (Kg CH ₄ ·Cabeza ⁻¹ ·Año ⁻¹) a una temperatura de 15 a 25 °C	Nivel de estimación
Ganado lechero	882	1,00	Nivel I
Ceba	721	1,14 ^b	Nivel II
Caprinos	200	0,17	Nivel I
Equinos	1000	1,64	Nivel I
Mulas y asnos	40	0,90	Nivel I
Porcinos	9.420	1,00	Nivel I
Aves de corral	6.329.240	0,02	Nivel I

b. Nieves y Olarte (2009).

La Ecuación A1.3 muestra la forma como se calcularon las emisiones de CH₄ producidas por la gestión del estiércol. En esta expresión matemática, se multiplicaron los factores de emisión por la población de ganado para cuantificar la cantidad emitida por cada categoría, y posteriormente se sumaron para dar cuenta de la cantidad total de CH₄ generado por la gestión del estiércol.

Ecuación A1.3

$$CH_{4 \text{ Estiércol}} = \sum_{(T)} \frac{(FE_{(T)} * N_{(T)})}{10^6}$$

Donde:

CH_{4 Estiércol} = Emisiones de CH₄ por la gestión del estiércol, para una población definida (Gg CH₄.Año⁻¹)

FE_(T) = Factor de emisión para la categoría de ganado definida (Kg CH₄.Cabeza⁻¹.Año⁻¹)

N_(T) = Cantidad de cabezas (población) de la categoría de ganado T del municipio de Cali

T = Categoría de ganado

- Estimaciones directas e indirectas de óxido nitroso (N₂O) por la gestión de estiércol

Para cuantificar las emisiones directas de N₂O en la categoría gestión de estiércol se consideraron las directrices dadas por el IPCC (2006, vol. 4). El cual argumenta que para estimar las emisiones directas de N₂O mediante una metodología de cálculo de Nivel I debe recopilarse información en cuanto a los siguientes aspectos: i) tipo y población de ganado; ii) tipo de sistema de gestión de estiércol; y iii) fracción de nitrógeno excretado por sistema de gestión de estiércol.

Con respecto a la información que considera el tipo y población de ganado, cabe indicar que se empleó la misma que se muestra en el Cuadro A1.8. Mientras que para definir el tipo de sistema de gestión de estiércol y la fracción de nitrógeno excretado por cada sistema de gestión de estiércol, fue necesario realizar una búsqueda bibliográfica con el fin de seleccionar el sistema que mejor se adaptara o representara las condiciones del municipio de Cali. Como resultado se encontró que la gestión de estiércol en pasto-corrales, corral de engorde, manejo de sólidos, cama profunda y elaboración de abono son los más representativos en el municipio (Murgueitio y Calle, 1999; SAC, 2002; IDEAM y PNLD, 2012b, tal como se presenta en el Cuadro A1.9.

Cuadro A1.9. Sistemas de gestión de estiércol en Cali.

Categoría de ganado	Sistemas de gestión de estiércol y fracción de nitrógeno excretado que se gestiona (%)					
	Pasturas	Corral de engorde	Manejo de sólidos	Distribución diaria	Cama profunda	Elaboración de abono
Vacas de alta producción	100					
Vacas de baja producción	95				5	
Vacas para producir carne	95				5	
Toros de reproducción	95				5	
Terneros predestetos	95				5	
Novillas de reemplazo	95				5	
Ganado de engorde	95				5	
Búfalos	95				5	
Ovejas	95				5	
Cabras	95				5	
Equinos	95				5	

(Continúa)

(Continuación)

Mulares y asnares	95				5	
Porcinos		41	20	2	37	
Aves ponedoras			90	2		8
Pollos de engorde			90	2		8
Cunicolas			90	2		8

Fuente: IDEAM y PNUD (2012b).

La Ecuación A1.3 muestra la formula general para estimar las emisiones directas de N_2O . Esta fórmula considera como variables de entrada la población de ganado (Ver Cuadro A1.4), la participación de los

sistemas de gestión de estiércol (Ver cuadro A1.9), y los factores de emisión establecidos por defecto como se muestra en el Cuadro A1.10.

Cuadro A1.10. Factores de emisión por sistema de gestión de estiércol.

Sistema de gestión de estiércol	FE_3 (kg N_2O -N. kg nitrógeno excretado ⁻¹)
Pasto-corrales	-
Corral de engorde	0,02
Manejo de sólidos	0,005
Distribución diaria	0
Cama profunda sin mezclado activo	0,01
Elaboración de abono	0,006

Fuente: IPCC (2006).

Ecuación A1.4.

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_s \left[\sum_T \left(N_{(T)} * Nex_{(T)} * MS_{(T,S)} \right) * FE_{3(s)} \right] * \frac{44}{28} \right]$$

Donde:

$N_2O_{D(mm)}$ = Emisiones directas de N_2O de la gestión de estiércol (kg N_2O . Año⁻¹)

$Nex_{(T)}$ = Promedio anual de excreción de nitrógeno por cabeza de la categoría T (kg N. Animal⁻¹.Año⁻¹)

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas (población) de la categoría de ganado T del municipio de Cali

$MS_{(T,S)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada categoría de ganado T, que se gestiona en el sistema de gestión de estiércol S (%)

$FE_{3(s)}$ = Factor de emisión para emisiones directas de N_2O del sistema de gestión de estiércol S (kg N_2O -N. kg N en el sistema de gestión de estiércol S)

S = Sistema de gestión de estiércol

T = Categoría de ganado

$\frac{44}{28}$ = Factor de conversión de emisiones de N_2O -N_(mm) a emisiones de $N_2O_{(mm)}$

El IPCC (2006) indica que la cantidad promedio anual de excreción de nitrógeno es una variable muy sensible a las diferentes categorías de peso en especies de ganado lechero, ceba, caprinos y porcinos entre otros. Por tal motivo, es recomendable hacer clasificación de las diferentes categorías de ganado con base en su edad y peso, para que así las diferentes tasas de excreción de nitrógeno por categoría de ganado puedan ser asignadas correctamente.

En este sentido, se realizó una búsqueda de literatura en relación a la forma cómo se maneja el ganado por grupos etáreos a nivel nacional y se obtuvo la información que se muestra en el Cuadro A1.11.

Cuadro A1.11. Información general para estimar las emisiones de CH₄ mediante una metodología de Nivel I y II.

Grupo etéreo	Edad	Peso
Terneritas de estaca	3 días a 5 meses	150 a 200
Novillas de levante	6 a 12 meses	150 a 250
Novillas vientre	12 a 18 meses	250 a 350
Novillas vientre	18 meses en adelante	350 a 500

Fuente: UNAL (2015).

Posteriormente, se realizó la respectiva comparación con la información obtenida de las Evaluaciones Pecuarias (EVAS) para el municipio de Cali (Gobernación del Valle, 2010) y se asignó a cada categoría de ganado los

siguientes valores de tasa de excreción de nitrógeno por defecto (ver Cuadro A1.12) para dar cuenta de la excreción anual de nitrógeno ($N_{ex(T)}$) mediante la Ecuación A1.5.

Cuadro A1.12. Información para determinar la excreción anual de nitrógeno por categoría de ganado.

Ganado (T)	Tasa de excreción de nitrógeno		
	Población (Cabezas)	Tasa de excreción de nitrógeno (Kg N. 1000 kg animal ⁻¹ . Día ⁻¹)	Peso de ganado adoptado (kg)
Ganado lechero	882	0,48	520
Ceba	721	0,36	380
Caprinos	200	1,37	30
Equinos	1.000	0,46	238
Mulares y asnares	40	0,46	130
Porcinos menores de 6 meses	8.562	0,55	28
Porcinos mayores de 6 meses	858	1,57	90
Aves ponedoras	2.163.237	0,82	1,8
Pollo de engorde	4.157.117	1,1	2,16
Aves de traspato	8.886	0,82	1,60

Ecuación A1.5

$$N_{ex(T)} = N_{indice(T)} * \frac{TAM}{1000} * 365$$

Donde:

$N_{ex(T)}$ = Excreción anual de nitrógeno para la categoría de ganado T (kg N. Animal⁻¹.Año⁻¹)

$N_{indice(T)}$ = Tasa de excreción de nitrógeno por defecto (kg N. 1000 kg masa animal⁻¹. Día⁻¹)

TAM = Masa animal típica para la categoría de ganado T (kg animal⁻¹)

Por otro lado, en el cálculo de emisiones indirectas de N₂O, debido a la volatilización del nitrógeno en forma de NH₃ y NO_x de los sistemas de gestión de estiércol, se multiplicó la cantidad de nitrógeno excretada (de todas

las categorías de ganado) y gestionada en cada sistema por la fracción de nitrógeno volatilizado (Ver Cuadro A1.13) y lixiviado (Ver Cuadro A1.14) para posteriormente sumar las pérdidas de nitrógeno de todos los sistemas de gestión del estiércol.

De acuerdo con el IPCC (2006, vol. 4), para cuantificar las emisiones indirectas de N₂O no solo se requiere información relacionada con las tasas de excreción de nitrógeno, sino también datos de las fracciones de pérdidas de nitrógeno (por defecto) de los sistemas de gestión del estiércol debidas a la volatilización y lixiviación. De esta manera, se muestran en las Ecuaciones A1.6 y A1.7 las expresiones para cuantificar las emisiones indirectas de N₂O.

Cuadro A1.13. Información para cuantificar las emisiones indirectas de N₂O por volatilización de los sistemas de gestión de estiércol.

Categoría de ganado	Pasturas	Corral de engorde	Manejo de sólidos	Distribución diaria	Cama profunda	Elaboración de abono
Ganado lechero	0,2	0	0	0	0	0
Ceba	0,3	0	0	0	0,3	0
Caprinos	0,25	0	0	0	0,25	0
Equinos	0,25	0	0	0	0,25	0
Mulares y asnares	0,25	0	0	0	0,25	0
Porcinos menores de 6 meses	0	0,4	0,45	0,4	0,4	0
Porcinos mayores de 6 meses	0	0,4	0,45	0,4	0,4	0
Aves ponedoras	0	0	0,4	0,4	0	0,4
Pollo de engorde	0	0	0,4	0,4	0	0,4
Aves de traspato	0	0	0,4	0,4	0	0,4

Fuente: IPCC (2006).

Cuadro A1.14. Información para cuantificar las emisiones indirectas de N₂O por lixiviación de los sistemas de gestión de estiércol.

Categoría de ganado	Pasturas	Corral de engorde	Manejo de sólidos	Distribución diaria	Cama profunda	Elaboración de abono
Ganado lechero	0,3	0	0	0	0	0
Ceba	0,4	0	0	0	0,4	0
Caprinos	0,35	0	0	0	0,35	0
Equinos	0,35	0	0	0	0,35	0
Mulares y asnares	0,35	0	0	0	0,35	0
Porcinos menores de 6 meses	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
Porcinos mayores de 6 meses	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
Aves ponedoras	0	0	0,5	0,5	0	0,5
Pollo de engorde	0	0	0,5	0,5	0	0,5
Aves de traspato	0	0	0,5	0,5	0	0,5

Fuente: IPCC (2006).

Ecuación A1.6.

$$N_2O_{Volatilización_{G(mm)}} = \left(\sum_s \left[\sum_T \left[\left(N_{(T)} * N_{ex(T)} * MS_{(T,S)} \right) * \left(\frac{Frac_{GasMS}}{100} \right)_s \right] \right] \right) * \left(FE_4 * \frac{44}{28} \right)$$

Donde:

$N_2O_{Volatilización_{G(mm)}}$ = Emisiones indirectas de N₂O debidas a la volatilización de nitrógeno de la gestión de estiércol (kg N₂O. Año⁻¹)

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas (población) de la categoría de ganado T del municipio de Cali

$N_{ex(T)}$ = Promedio anual de excreción de nitrógeno por cabeza de la categoría T (kg N. Animal⁻¹.Año⁻¹)

$MS_{(T,S)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada categoría de ganado T, que se gestiona en el sistema de gestión de estiércol S (%)

FE_4 = Factor de emisión para emisiones de N_2O resultantes de la deposición atmosférica de nitrógeno en la superficie del suelo o del agua $[0,01 \text{ kg } N_2O-N. (\text{kg } NH_3-N + NO_x-N \text{ volatilizado})^{-1}]$

$Frac_{GasMS}$ = Porcentaje de nitrógeno del estiércol gestionado para la categoría de ganado T que se volatiliza como NH_3 y NO_x en el sistema de gestión de estiércol S (%)

Ecuación A1.7

$$N_2O_{Lixiviación_{G(mm)}} = \left(\sum_s \left[\sum_T \left[\left(N_{(T)} * N_{ex(T)} * MS_{(T,S)} \right) * \left(\frac{Frac_{leachMS}}{100} \right) \right] \right] \right) * \left(FE_5 * \frac{44}{28} \right)$$

$N_2O_{Lixiviación_{G(mm)}}$ = Emisiones indirectas de N_2O debidas a lixiviación y escurrimiento de la gestión de estiércol ($\text{kg } N_2O. \text{ Año}^{-1}$)

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas (población) de la categoría de ganado T del municipio de Cali

$N_{ex(T)}$ = Promedio anual de excreción de nitrógeno por cabeza de la categoría T ($\text{kg } N. \text{ Animal}^{-1}. \text{ Año}^{-1}$)

$MS_{(T,S)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada categoría de ganado T que se gestiona en el sistema de gestión de estiércol S (%)

FE_5 = Factor de emisión para emisiones de N_2O debidas a lixiviación y escurrimiento de nitrógeno ($0,0075 \text{ kg } N_2O-N. \text{ kg } N \text{ lixiviado}^{-1}$)

$Frac_{LeachMS}$ = Porcentaje de nitrógeno del estiércol gestionado para la categoría de ganado T, que se volatiliza como NH_3 y NO_x en el sistema de gestión de estiércol S (%)

Emisiones y absorciones de dióxido de carbono (CO_2)

Las emisiones y absorciones de CO_2 se determinaron con base en las directrices del IPCC (2006) y la orientación sobre las buenas prácticas para el uso de la tierra, cambios del uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2003). Inicialmente se trabajó con el mapa de coberturas y uso del suelo del municipio de Cali en el período 2006–2010 con el objetivo de extraer la hectáreas sembradas en bosques, forestales, tierras de cultivos y Praderas como se presenta en la Figura A1.6.

Posteriormente, se realizó la diferencia entre los diferentes tipos de coberturas para identificar los cambios en el uso del suelo en el período de tiempo mencionado anteriormente. Como resultado de esto se encontró que la cobertura de bosques, tierras forestales y praderas aumentaron en 25,89, 4,32 y 8,71 ha, respectivamente; mientras que las tierras agrícolas disminuyeron en

12,51 ha. Con base en esto, se determinó que el cambio entre coberturas se dio de tierras agrícolas a forestales (4.315 ha) y a praderas (8.709 ha) tal como se presenta en el Cuadro A1.15.

La información generada en el Cuadro A1.11 se empleó básicamente para definir, en términos cualitativos, las posibles categorías en las cuales se generaron emisiones o absorciones de CO_2 por el cambio de cobertura en el municipio de Cali. En este sentido, se estableció con base en IPCC (2006) que en las categorías tierras que permanecen como tales y tierras agrícolas convertidas en forestales hubo absorciones de CO_2 debido al aumento de cobertura en bosque natural y tierras forestales, mientras que en la categoría tierras agrícolas convertidas en praderas hubo emisiones de CO_2 .

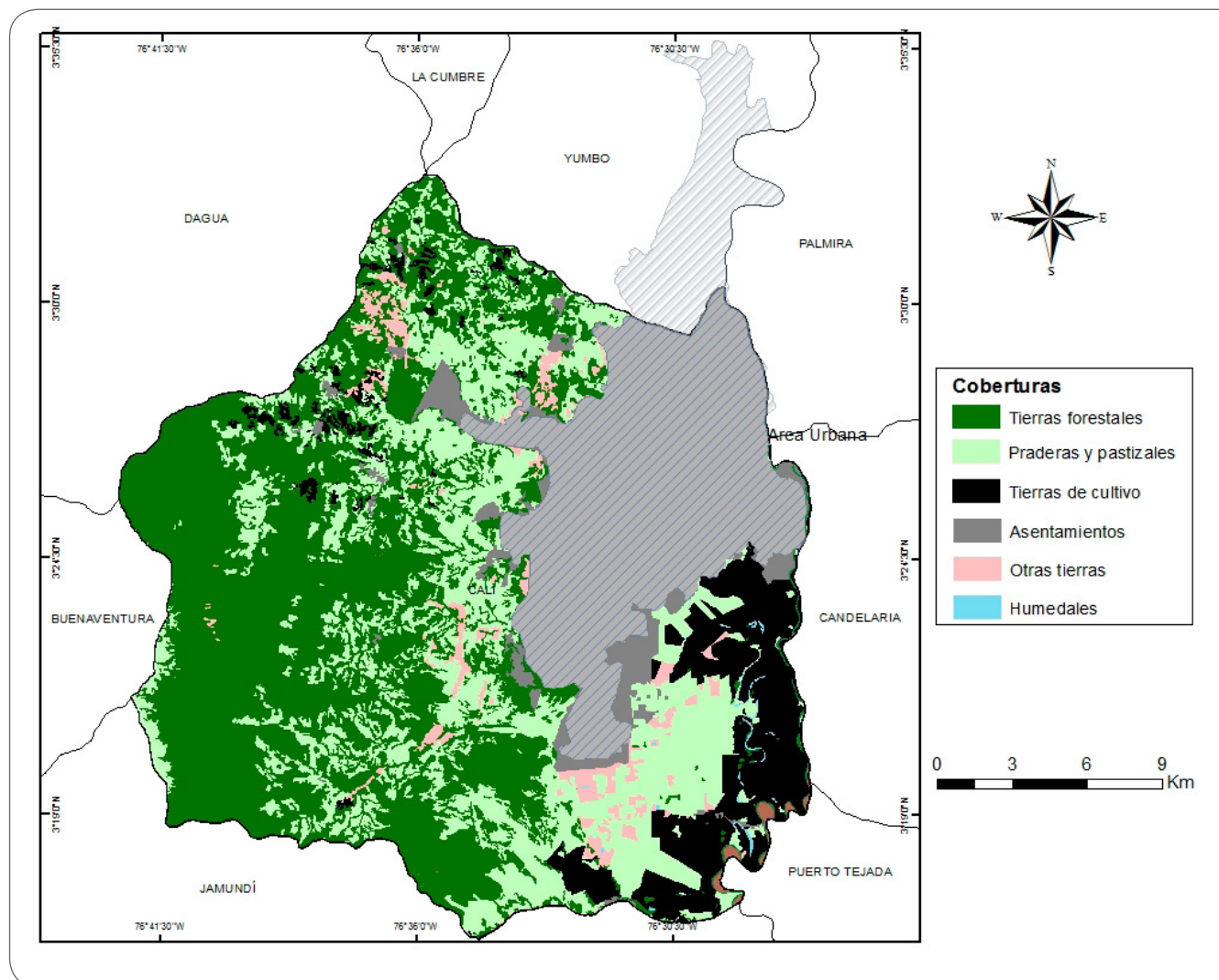


Figura A1.6. Coberturas en el municipio de Santiago de Cali, período 2006–2010.

Cuadro A1.15. Cambio de coberturas en el municipio de Cali en el período 2006–2010.

Tipo de coberturas		Cobertura (ha)		Cambio de cobertura (ha)	
		2006	2010		
Bosque natural	Bosque húmedo tropical	18.255,36	18.281,25	25,89	Tierras que permanecen como tales
Tierras forestales	Arbustales	4.110,49	4.114,80	4,32	Tierras agrícolas convertidas en forestales
Tierras agrícolas	Cultivos permanentes	4.469,63	4.458,59	-12,51	
	Cultivos transitorios	760,83	759,37		
Praderas	Herbazales	292,97	307,30	8,71	Tierras agrícolas convertidas en praderas
	Pastos	13.878,02	13.872,40		

En las categorías tierras que permanecen como tales y tierras agrícolas convertidas en forestales también se consideraron emisiones de CO₂ asociadas a incendios forestales y quema de cultivos agrícolas (caña de azúcar) en 2010, para lo cual se consultó el estudio realizado por

Millán (2010) y solicitó información a CENICAÑA (2015) con el ánimo de obtener datos sobre las superficies quemadas, como se muestra en el Cuadro A1.16 y A1.17, respectivamente.

Cuadro A1.16. Hectáreas de tierras forestales quemadas.

Mes	Área quemada en el sector rural (ha)	Área quemada en el sector urbano (ha)	Área total (ha)
Enero	37,87	3,15	41,01
Febrero	24,60	4,01	28,61
Marzo	24,21	1,91	26,12
Abril	13,05	0,02	13,07
Mayo	0,00	0,33	0,33
Junio	2,06	1,16	3,22
Julio	1,00	0,40	1,41
Agosto	4,47	0,48	4,94
Septiembre	6,80	0,31	7,11
Octubre	29,07	1,14	30,21
Total			156,04

Fuente: Millán (2010).

Cuadro A1.17. Hectáreas de tierras agrícolas (caña de azúcar) quemadas.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficie cosechada	Ha	3.978,3	CENICAÑA (2015)
Porcentaje de área quemada	%	30	
Superficie quemada	Ha	1.193,5	

Dentro de la orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambios de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2003) se establecen tres depósitos o almacenamientos de carbono (biomasa viva, materia orgánica muerta y suelos) para dar cuenta de las emisiones y absorciones de CO₂ en las categorías de uso de la tierra mencionadas en el Cuadro A1.18.

De acuerdo con el IPCC (2003) la metodología mediante la cual se estiman los depósitos de carbono se fundamenta en dos ideas mutuamente vinculadas; en la primera, se presupone que el flujo de CO₂ hacia la atmósfera o desde ella es igual a la variación de las reservas de carbono en la biomasa y el suelo existente;

mientras que en la segunda, es posible estimar la variación de las reservas de carbono estableciendo en primer lugar tasas de cambio de uso de la tierra y prácticas utilizadas para llevar a cabo ese cambio, como lo constituyen la quema y tala selectiva en tierras forestales, agrícolas y praderas.

Sin embargo, debido al tipo y calidad de información que se logró gestionar para el municipio de Cali en el 2010, solo se cuantificaron emisiones y absorciones en la biomasa viva, la cual incluye tanto la biomasa sobre el suelo (tallos, ramas, corteza y follaje) como la biomasa bajo el suelo (raíces vivas > 2 mm de diámetro).

Emisiones y absorciones de CO₂ en tierras forestales que permanecen como tales

Para cuantificar las emisiones y absorciones de CO₂ en tierras que permanecen como tales se empleó la información dispuesta en el Cuadro A1.18 junto con la Ecuación A1.8. Sobre las variables del Cuadro A1.18 cabe mencionar que el incremento de biomasa, relación

raíz-vástago y fracción de carbono de la materia seca se tomaron por defecto de acuerdo a las recomendaciones del IPCC (2003), mientras que las reservas de biomasa y fracción de biomasa descompuesta en tierras forestales se adoptaron de acuerdo al estudio realizado por Yepes et al. (2011) y Olarte et al. (2004) a nivel nacional y regional, respectivamente.

Cuadro A1.18. Información para cuantificar las emisiones/absorciones de CO₂.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficie de tierras que permanecen como tales	Ha	25.887	
Periodo de cambio de uso del suelo	Año	4	
Superficie de tierras que permanecen como tales anualmente	Ha.año ⁻¹	6.471	
Incremento de biomasa	Ton ms. ha ⁻¹ .año ⁻¹	7	IPCC (2003)
Relación raíz - vástago	Sin dimensiones	0,42	
Superficies forestales quemadas	Ha	156,04	Millán (2010)
Reservas de biomasa en áreas forestales	Ton ms.ha ⁻¹	264,1	Yepes et al. (2011)
Fracción de biomasa descompuesta	Sin dimensiones	0,95	Olarte et al. (2004)
Fracción de carbono de la materia seca	Ton C. ton ms ⁻¹	0,5	IPCC (2003)

Ecuación A1.8

$$\Delta_{TFTF} = (\Delta_{TFTF_C} - \Delta_{TFTF_P}) * \frac{44}{12}$$

Donde:

Δ_{TFTF} = Variación anual de las reservas de carbono en tierras forestales que siguen siendo tierras forestales (ton C.año⁻¹)

Δ_{TFTF_C} = Aumento anual de las reservas de carbono debido al crecimiento de la biomasa viva (ton C.año⁻¹)

Δ_{TFTF_P} = Disminución anual de las reservas de carbono debido a la pérdida de biomasa por incendios (ton C.año⁻¹)

44/12= Factor de conversión para expresar las emisiones/absorciones en CO₂ (ton CO₂. ton C⁻¹)

Ecuación A1.9

$$\Delta_{TFTF_C} = S_{TFTF_C} * (C_W + C_W R) * FC$$

Donde:

S_{TFTF} = Superficie de tierras forestales que siguen siendo tierra forestales (ha)

C_W = Incremento anual medio de la biomasa sobre el suelo (ton ms.ha⁻¹.año⁻¹)

R= Relación raíz-vástago apropiada para los incremento (sin dimensiones)

FC= Fracción de carbono de la materia seca (ton C. ton ms⁻¹)

- **Emisiones y absorciones de CO₂ en tierras de cultivo convertidas a tierras forestales**

Para estimar las emisiones y absorciones de CO₂ en tierras de cultivo convertidas a tierras forestales se empleó la información dispuesta en el Cuadro A1.19 junto con la Ecuación A1.10. Sobre las variables del Cuadro A1.19 cabe mencionar que el incremento de biomasa, relación raíz-vástago y fracción de carbono de la materia seca se tomaron por defecto de acuerdo a las recomendaciones del IPCC (2003), mientras que las reservas de biomasa en tierras agrícolas antes y después de la conversión en tierras forestales con base al estudio realizado por Yepes et al. (2011) a nivel nacional.

Por otro lado, para obtener información sobre las reservas de biomasa en cultivo de caña de azúcar, relación residuo: cultivo y porcentaje de materia seca se consultó directamente con CENICAÑA (2015); y para seleccionar el valor de la fracción de biomasa descompuesta en

cultivos de caña de azúcar se consultaron diferentes publicaciones (IPCC, 2006; Bohórquez y Lugo, 2010; Delgadillo, 2014) de las cuales se seleccionó el valor reportado por Macedo et al. (2004).

Ecuación A1.10.

$$\Delta_{TFTF_p} = S_{TFTF_p} * B_w * (1 - f_{BD}) * FC$$

Donde:

S_{TFTF_p} = Superficies forestales afectadas por incendios (ha.año⁻¹)

B_w = valor medio de las reservas de biomasa en áreas forestales (ton ms.ha⁻¹)

f_{BD} = Fracción de biomasa que queda en el bosque y se descompone (transferida materia orgánica muerta)

FC = Fracción de carbono de la materia seca (ton C. ton ms⁻¹)

Cuadro A1.19. Información para estimar las emisiones y absorciones de CO₂.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficie de tierras agrícolas convertidas en forestales	Ha	4,32	IDEAM (2006) y CVC (2010)
Período de cambio de uso del suelo	Año	4	
Superficie de tierras agrícolas convertidas en tierras forestales anualmente	Ha.año ⁻¹	1,08	
Incremento de biomasa	Ton ms.ha ⁻¹ .año ⁻¹	7	IPCC (2003)
Relación raíz - vástago	Sin dimensiones	0,42	IPCC (2003)
Reservas de biomasa en tierras agrícolas después de la conversión en tierras forestales	Ton ms.ha ⁻¹	264,10	Yepes et al. (2011)
Reservas de biomasa presentes en tierras agrícolas antes de la conversión en tierras forestales	Ton ms.ha ⁻¹	66,20	
Superficie de tierras agrícolas (caña de azúcar) quemadas	Ha	1.193,50	CENICAÑA (2015)
Reservas de biomasa en el cultivo de caña de azúcar	Ton.ha ⁻¹	157	
Relación residuo: cultivo	Sin dimensiones	0,11	
Porcentaje de materia seca	%	30	CENICAÑA (2015)

(Continúa)

(Continuación)

Fracción de biomasa descompuesta	Sin dimensiones	0,20	Macedo et al. (2004)
Fracción de carbono de la materia seca	Ton C. ton ms ⁻¹	0,5	IPCC (2003)

Emisiones y absorciones de CO₂ en tierras de cultivo convertidas a pastizales

En cuanto a las emisiones y absorciones de CO₂ en tierras de cultivo convertidas a pastizales/praderas se empleó la información dispuesta en el Cuadro A1.20 junto con la Ecuación A1.11. Sobre las variables del Cuadro A1.20, cabe mencionar que las reservas de carbono en la biomasa antes y después de la conversión en praderas se adoptaron del estudio realizado por Yepes et al. (2011) a nivel nacional para este tipo de cobertura específicamente.

Ecuación A1.11

$$\Delta_{TTF} = \Delta_{TTF \text{ Crecimiento}} + \Delta_{TTF \text{ Conversión}} - \Delta_{TTF \text{ Pérdida}}$$

Donde:

Δ_{TTF} = variación anual de las reservas de carbono en tierras convertidas en tierras forestales (ton C.año⁻¹)

$\Delta_{TTF \text{ Crecimiento}}$ = incremento anual de las reservas de carbono en la biomasa viva por efecto del crecimiento en tierras convertidas en tierras forestales (ton C.año⁻¹)

$\Delta_{TTF \text{ Conversión}}$ = variación anual de las reservas de carbono en la biomasa viva por efecto de la conversión efectiva en tierras forestales (ton C.año⁻¹)

$\Delta_{TTF \text{ Pérdida}}$ = disminución anual de las reservas de carbono en la biomasa viva por efecto de las pérdidas ocasionadas por quema de cultivos agrícolas (caña de azúcar) (Ton C.año⁻¹)

Ecuación A1.12

$$\Delta_{TTF \text{ Crecimiento}} = S_{TTF} * (C_W + C_W R) * FC$$

Donde:

S_{TTF} = superficie de tierras convertida en tierras forestales (ha)

C_W = incremento anual medio de la biomasa sobre el suelo (ton ms.ha⁻¹.año⁻¹)

R= relación raíz-vástago apropiada para los incremento (sin dimensiones)

FC= fracción de carbono de la materia seca (ton C. ton ms⁻¹)

Ecuación A1.13

$$\Delta_{TTF \text{ TTF}_{\text{Conversión}}} = [B_{\text{Después}} - B_{\text{Antes}}] * \Delta_{\text{En Bosque}} * FC$$

$B_{\text{Después}}$ = reservas de biomasa en tierras agrícolas después de la conversión en tierras forestales (ton ms.ha⁻¹)

B_{Antes} = reservas de biomasa presentes en tierras agrícolas antes de la conversión en tierras forestales (ton ms.ha⁻¹)

$\Delta_{\text{En Bosque}}$ = superficie de tierras agrícolas convertida anualmente en tierras forestales (ha.año⁻¹)

FC= fracción de carbono de la materia seca (ton C. ton ms⁻¹)

Ecuación A1.14

$$\Delta_{TTF \text{ Pérdida}} = S_{TTF_p} * \rho_{\text{Biomasa}} * R_{rc} * m_{\text{seca}} * (1 - f_{BD}) * FC$$

Donde:

S_{TTF_p} = superficies en tierras de cultivo (caña de azúcar) afectadas por incendios (ha.año⁻¹)

ρ_{Biomasa} = valor medio de las reservas de biomasa en el cultivo de caña de azúcar (ton.ha⁻¹)

R_{rc} = relación residuo/cultivo (sin dimensiones)

m_{seca} = orcentaje de materia seca en el cultivo de caña de azúcar (%)

f_{BD} = fracción de biomasa descompuesta (transferida a materia orgánica muerta) (sin dimensiones)

FC= fracción de carbono de la materia seca (ton C. ton ms⁻¹)

Cuadro A1.20. Información para estimar las emisiones y absorciones de CO₂.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficie de tierras agrícolas convertidas en praderas	Ha	8.709	IDEAM (2006) y CVC (2010)
Período de cambio de uso del suelo	Año	4	
Superficie de tierras agrícolas convertidas en tierras forestales anualmente	Ha.año ⁻¹	2.177	
Reservas de carbono en la biomasa después de la conversión en praderas	Ton C.ha ⁻¹	20,5	Yepes et al. (2011)
Reservas de carbono en la biomasa antes de la conversión en praderas	Ton C.ha ⁻¹	33,1	

Ecuación A1.15

$$\Delta_{TP} = S_{Conversión} * (T_{Conversión} + \Delta_{Crecimiento})$$

Donde:

Δ_{TP} = variación total de las reservas de carbono en tierras convertidas en praderas (ton C.año⁻¹)

$S_{Conversión}$ = superficie anual de tierras convertidas en praderas a partir de un uso inicial (ha.año⁻¹)

$T_{Conversión}$ = variación de las reservas de carbono por unidad de superficie para ese tipo de conversión cuando la tierra es convertida a pradera (ton C.ha⁻¹)

Ecuación A1.16

$$T_{Conversión} = C_{Después} - C_{Antes}$$

Donde:

$C_{Después}$ = reservas de carbono en la biomasa inmediatamente después de la conversión en pradera (ton C.ha⁻¹)

C_{Antes} = reservas de carbono en la biomasa inmediatamente antes de la conversión pradera (ton.ha⁻¹)

Teniendo en cuenta que la información empleada para calcular las emisiones y absorciones de CO₂ en esta

categoría solo permitieron llegar a un nivel de estimación de Nivel I, la variable $\Delta_{Crecimiento}$ toma un valor igual a cero, ya que según el IPCC (2003) las reservas de biomasa en praderas recientemente establecidas tienden a nivelarse al cabo de unos años después de la conversión (p. ej., entre 1 y 2 años para la biomasa herbácea sobre el suelo, y entre 3 y 5 años para la biomasa bajo el suelo), en función del tipo de conversión de la tierra, del clima y de las condiciones de gestión, por lo que el valor por defecto de la variación de las reservas de biomasa es cero.

Emisiones de GEI distintos al CO₂ por quema de biomasa en tierras forestales

Para la determinación de las emisiones de GEI distintos al CO₂ por quema de biomasa en tierras forestales se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por el IPCC (2006), las cuales indican que se requiere de información relacionada con las hectáreas de tierras forestales quemadas y factores de emisión por tipo de contaminante generado durante el incendio, además de las variables mencionadas en el Cuadro A1.21.

Cuadro A1.21. Información para estimar las emisiones de GEI distintos al CO₂.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficies forestales quemadas	Ha	156,04	Millán (2010)
Densidad de biomasa forestal	Ton ms.ha ⁻¹	264,1	Yepes et al. (2011)
Fracción de biomasa descompuesta	Sin dimensiones	0,95	Olarte et al. (2004)
Fracción de biomasa oxidada		0,30	
Factores de emisión	g CH ₄ .Kg ms quemada	6,8±2,0	IPCC (2006)
	g N ₂ O.Kg ms quemada	0,20	
	g CO. Kg ms quemada	104±20	
	g NO _x . Kg ms quemada	1,6±0,7	
	g COVDMs. Kg ms quemada	10	

Teniendo en cuenta la información del Cuadro A1.21 se cuantificaron las emisiones de GEI mediante la Ecuación A1.17. La cual considera las siguientes variables de entrada: i) Superficie o área quemada; ii) Cantidad de biomasa realmente quemada; y iii) Factor de emisión por cada tipo de contaminante.

Ecuación A1.17

$$L_{\text{Incendio}} = \frac{S_{\text{TFTFP}} * (M_B C_f) * G_{FE}}{10^6}$$

Donde:

L_{Incendio} = Cantidad de emisiones de GEI distintos al CO₂ por incendios forestales (Gg de gas)

S_{TFTFP} = Superficie de tierras forestales quemadas o incendiadas (ha.año⁻¹)

$M_B C_f$ = Cantidad de combustible realmente quemado (Ton ms quemada.ha⁻¹)

G_{FE} = Factores de emisión (g de cada gas. kg ms quemada⁻¹)

Con relación a la cantidad de combustible realmente quemado ($M_B C_f$), es importante anotar que este se determinó multiplicando la densidad de biomasa

forestal seca, la fracción de biomasa descompuesta en el sitio y biomasa oxidada como se muestra en la Ecuación A1.18.

Ecuación A1.18

$$M_B C_f = B_w * (1 - f_{BD}) * F_{B.Oxid}$$

Donde:

B_w = Reservas de biomasa en áreas forestales (ton ms.ha⁻¹)

f_{BD} = Fracción de biomasa que queda en el bosque y se descompone (sin dimensiones)

$1-f_{BD}$ = Fracción de biomasa quemada en el sitio (sin dimensiones)

$F_{B.Oxid}$ = Fracción de biomasa oxidada (sin dimensiones)

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es que los valores de los parámetros mencionados en la Ecuación A1.18 se fijaron teniendo en cuenta el tipo de Bioma (bosque húmedo tropical) correspondiente al municipio de Cali y estudios realizados por Olarte et al. (2004) y Yepes et al. (2011) en cuanto a la estimación de estas variables a nivel nacional y regional (Ver Figura A1.7).

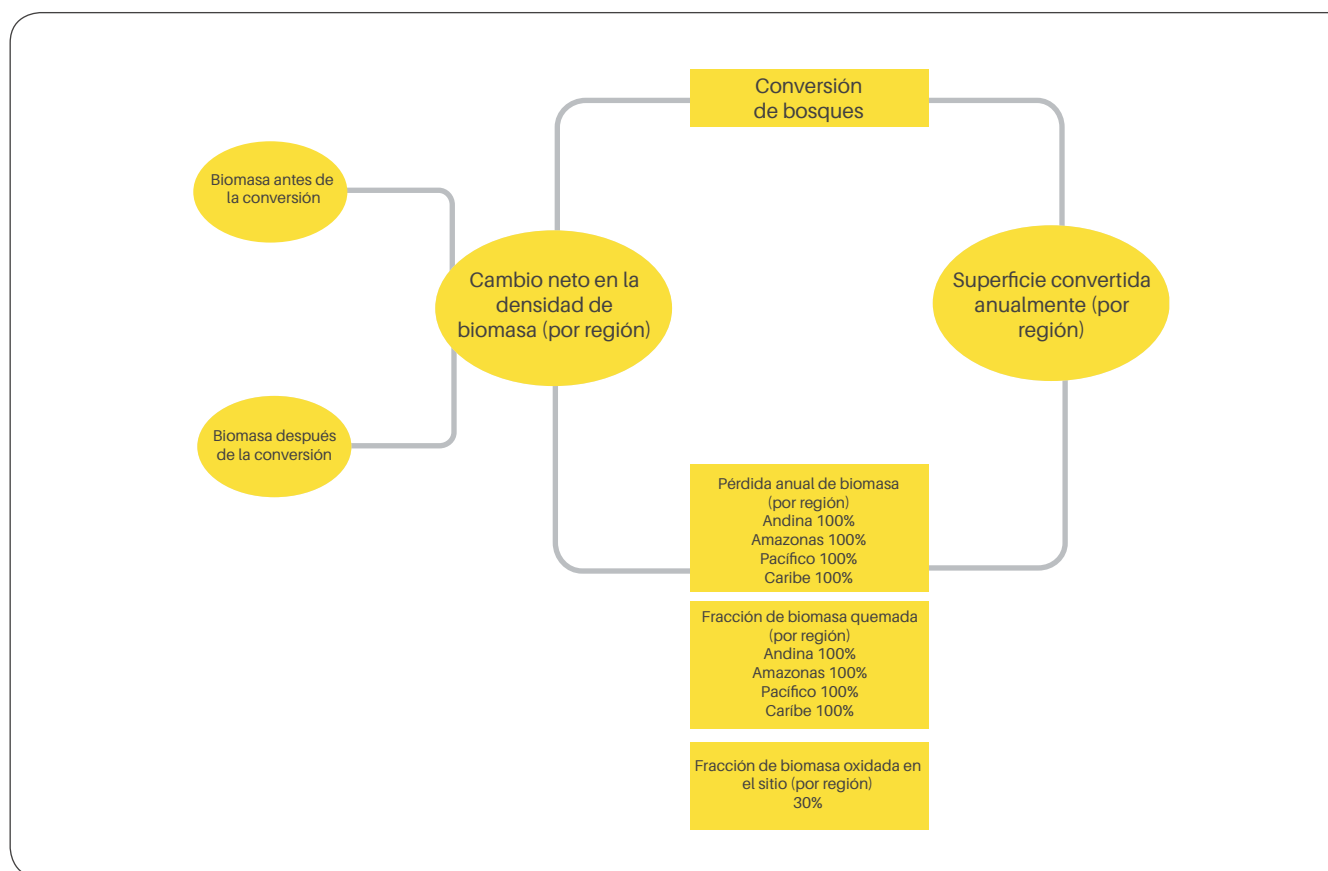


Figura A1.7. Proceso de conversión de bosques y fracciones de biomasa propuestas por región.

Fuente: Adaptado de Olarte et al. (2004).

Emisiones de GEI distintos al CO₂ por quema de biomasa en tierras de cultivo

Para estimar las emisiones de GEI distintos al CO₂ por la quema del cultivo de caña de azúcar en el municipio de Cali durante el 2010 se empleó la metodología de cálculo descrita por el IPCC (2006). En la información necesaria para realizar este tipo de estimaciones se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: i) superficie de caña quemada, ii) reservas de biomasa en el cultivo de caña de azúcar, iii) relación residuo/cultivo, iv) fracción de biomasa seca, v) factor de oxidación, y vi) factores de emisión por defecto para cada tipo de contaminante.

Para obtener información sobre la superficie de cultivos de caña quemada, reservas de biomasa, relación residuo/cultivo y fracción de biomasa seca se realizó la respectiva solicitud de información a CENICAÑA (2015), mientras que los demás parámetros (factor de oxidación y emisión) se establecieron con base en una búsqueda de literatura y atendiendo las recomendaciones dadas por el IPCC (2006).

En el Cuadro A1.22 se presenta la información recopilada para cuantificar las emisiones de GEI distintos al CO₂ debido a la quema de caña que se practica en Cali.

Cuadro A1.22. Información para estimar las emisiones de GEI distintos al CO₂.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Superficie quemada	Ha	1.193,5	CENICAÑA (2015)
Densidad de biomasa	Ton.ha ⁻¹	157	
Relación residuo/cultivo	Adimensional	0,11	
Fracción de materia seca	%	30	
Factor de combustión	%	50	Delgadillo (2014)
		76	Bohórquez y Lugo (2010)
		80	Macedo et al. (2004)
		80	
Factores de emisión	g CH ₄ .Kg ms quemada	2,7	IPCC (2006)
	g N ₂ O.Kg ms quemada	0,07	
	g CO. Kg ms quemada	92	
	g NO _x . Kg ms quemada	2,5	
	g COVDMs. Kg ms quemada		

Con base en la información dispuesta en el Cuadro A1.22, se cuantificaron las emisiones de GEI distintos al CO₂ mediante la Ecuación A1.19. La cual considera las siguientes variables de entrada: i) Superficie o área quemada, ii) Cantidad de combustible realmente quemado, y iii) Factor de emisión por cada tipo de contaminante.

Ecuación A1.19

$$L_{\text{Incendio}} = \frac{S_{\text{TTFP}} * (M_B C_f) * G_{FE}}{10^6}$$

Donde:

L_{Incendio} = Cantidad de emisiones de GEI distintos al CO₂ (Gg de gas)

S_{TTFP} = Superficies en caña de azúcar afectadas por incendios (ha.año⁻¹)

$M_B C_f$ = Cantidad de combustible realmente quemado (ton de caña seca quemada.ha⁻¹)

G_{FE} = Factores de emisión (g de cada gas. kg de caña seca quemada⁻¹)

Con relación a la cantidad de combustible realmente quemado ($M_B C_f$) es importante anotar que este se determinó multiplicando las reservas de biomasa, relación residuo/cultivo, fracción de materia seca y el factor de oxidación tal como se muestra en la Ecuación A1.20.

Ecuación A1.20

$$M_B C_f = \rho_{\text{Biomasa}} * R_{rc} * m_{\text{seca}} * F_{\text{combustión}}$$

Donde:

ρ_{Biomasa} = Reservas de biomasa en el cultivo de caña de azúcar (ton.ha⁻¹)

R_{rc} = Relación residuo/cultivo (sin dimensiones)

m_{seca} = Porcentaje de materia seca en el cultivo de caña (sin dimensiones)

$F_{\text{combustión}}$ = Factor de combustión (sin dimensiones)

Emisiones de CO₂ por la aplicación de fertilizantes nitrogenados

Para dar cuenta de las emisiones de CO₂ debido al uso de fertilizantes nitrogenados en cultivos agrícolas del municipio de Cali durante 2010, se empleó una metodología de cálculo de Nivel I, teniendo en cuenta lo mencionado por el IPCC (2006); el cual indica que para realizar este tipo de estimaciones se debe conocer la cantidad anual de nitrógeno aplicado junto con un factor de emisión establecido por defecto.

En este sentido, se recopiló información sobre los cultivos agrícolas sembrados en el municipio de Cali durante 2010, accediendo a la información dispuesta en la página de la Gobernación del Valle del Cauca en

lo que respecta a las Evaluaciones y Costos Agrícolas de cultivos transitorios y permanentes. De las EVAS se logró conseguir información de las superficies (ha) sembradas, mientras que de los Costos Agrícolas se obtuvo información relacionada con la cantidad de fertilizantes nitrogenados (simples y compuestos) aplicados por hectárea según el tipo de cultivo (Ver Cuadro A1.23).

A la información presentada en el Cuadro A1.23 posteriormente se le realizó un manejo de datos para expresar la cantidad de nitrógeno aplicado en términos de Urea, teniendo en cuenta que la información obtenida de los Costos Agrícolas diferenciaba entre fertilizantes nitrogenados simples² y compuestos³.

Para el manejo de datos inicialmente se realizó una búsqueda de literatura y consulta con expertos para definir el grado o concentración (en porcentaje) de nitrógeno en fertilizantes simples y compuestos que fueran comúnmente aplicados en cultivos agrícolas de la región del Valle del Cauca. Como resultado de este, ejercicio y para efectos de cálculo se definió que en fertilizantes simples se utilizaría un grado de nitrógeno del 46%, mientras que para fertilizantes compuestos con dos (nitrógeno-fósforo) y tres (nitrógeno-fósforo-potasio) nutrientes se emplearía un grado de nitrógeno del 24% y 15%, respectivamente.

Como parte de este proceso, también se notó que en la información obtenida de los costos agrícolas, la cantidad de fertilizantes estaban expresadas en términos de bulto, una unidad no muy conveniente para los fines de este trabajo; por esta razón, se realizó una búsqueda de literatura con el objetivo de conocer la forma en que normalmente son expedidos los fertilizantes.

Como resultado de esto, se encontró que debido a su simplicidad, flexibilidad y seguridad (contra la intemperie y grandes pérdidas así como la adulteración) la bolsa o bulto de 50 kg es el principal método de distribución para pequeños agricultores (IFA y FAO, 2002).

Luego de seleccionar cuidadosamente la información para el manejo de datos, se empleó la Ecuación A1.21 con el fin expresar la cantidad de nitrógeno aplicado en términos de urea. Los resultados correspondientes al manejo de datos se presentan en el Cuadro A1.24.

Ecuación A.21

$$M = \frac{S_{(T)} * C_{(t,c)} * \left(\frac{G_{(t,c)}}{100} \right) * F * F_{N-CO(NH_2)_2}}{10^6}$$

Donde:

M= cantidad de fertilizante aplicado en forma de Urea [Gg CO(NH₂)₂]

S_(T)=Superficie sembrada por tipo de cultivo T (ha)

C_(t,c) = cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado según su tipo (t) y componente (c) (Bulto.ha⁻¹)

G_(t,c) = Grado de fertilizante nitrogenado aplicado según su tipo (t) y componente (c) (%)

F= Factor de conversión de Bulto a kilogramo de fertilizante nitrogenado (50 Kg.Bulto⁻¹)

F_{N-CO(NH₂)₂}= Factor de conversión de nitrógeno a urea [2,143 Kg CO(NH₂)₂. Kg N⁻¹]

T= Indica el tipo de cultivo

t= Corresponde al tipo de fertilizante (simple o compuesto)

c= Determina el tipo nutriente en el fertilizante (nitrógeno, fósforo y potasio)

10⁶= Factor de conversión de kilogramos (Kg) a Gigagramos (Gg) de urea (Gg CO(NH₂)₂. Gg CO(NH₂)₂⁻¹)

² Fertilizantes que contienen solo un nutriente primario (nitrógeno).

³ Fertilizantes que contienen dos o tres nutrientes primarios (nitrógeno- fósforo; y nitrógeno-fósforo-potasio).

Cuadro A1.23. Cantidad de fertilizantes nitrogenados (simples y compuestos) aplicados por hectárea de cultivo.

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (ha)	Fertilizante		Cantidad (Bulto.ha ⁻¹)
		Tipo	Componentes	
Frijol de ladera	15	Compuesto	N-P-K	5
Maíz ladera	110	Compuesto	N-P	2
		Simple	N	7
Café	609,5	Simple	N	6
		Compuesto	N-P	2
Caña de azúcar	5726 (azúcar)	Simple	N	7
Plátano	42	Simple	N	6
		Compuesto	N-P-K	7
Frijol plana	5	Simple	N	5
		Compuesto	N-P-K	5
Arveja	10	Simple	N	3
		Compuesto	N-P-K	4
Cilantro	15	Simple	N	4
		Compuesto	N-P-K	6
Lechuga	12	Compuesto	N-P	2
		Compuesto	N-P-K	7
Pimentón	5	Simple	N	2
		Compuesto	N-P-K	3
Tomate	34	Compuesto	N-P-K	9
Repollo	12	Compuesto	N-P	2
		Compuesto	N-P-K	7
Zapallo	20	Compuesto	N-P-K	2
Aguacate	15	Simple	N	3,6
		Compuesto	N-P-K	7,2
Banano	20	Simple	N	2
		Compuesto	N-P-K	4
Cítricos	40	Simple	N	7,5
		Compuesto	N-P	3
		Compuesto	N-P-K	15
Guayaba	15	Simple	N	1,0
		Compuesto	N-P-K	4
Lulo	12	Compuesto	N-P	1,4
		Compuesto	N-P-K	5,6
Mora	8	Compuesto	N-P	3
		Compuesto	N-P-K	40
Tomate de árbol	12	Simple	N	5
		Compuesto	N-P-K	8,4
		Compuesto	N-P	2

Cuadro A1.24. Cantidad total anual de fertilizante nitrogenado en forma de urea.

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (ha)	Cantidad (Bulto. ha ⁻¹)	Fertilizante				Cantidad
			Tipo	Grado (%)			(ton CO(NH ₂) ₂)
				N	P	K	
Frijol de ladera	15	5	Compuesto	15	15	15	1,21
Maíz ladera	110	2	Compuesto	24	24		43,61
		7	Simple	46			
Café	609,5	6	Simple	46			211,58
		2	Compuesto	24	24		
Caña de azúcar	5.726	2,1	Simple	46			592,64
Plátano	42	6	Simple	46			17,15
		7	Compuesto	15	15	15	
Frijol plana	5	5	Simple	46			1,63
		5	Compuesto	15	15	15	
Arveja	10	3	Simple	46			2,12
		4	Compuesto	15	15	15	
Cilantro	15	4	Simple	46			4,40
		6	Compuesto	15	15	15	
Lechuga	12	2	Compuesto	24	24		1,97
		7	Compuesto	15	15	15	
Pimentón	5	2	Simple	46			0,73
		3	Compuesto	15	15	15	
Tomate	34	9	Compuesto	15	15	15	4,92
Repollo	12	2	Compuesto	24	24		1,97
		7	Compuesto	15	15	15	
Zapallo	20	2	Compuesto	15	15	15	0,64
Aguacate	15	3,6	Simple	46			4,40
		7,2	Compuesto	15	15	15	
Banano	20	2	Simple	46			3,26
		4	Compuesto	15	15	15	
Cítricos	40	7,5	Simple	46			27,51
		3	Compuesto	24	24		
		15	Compuest0	15	15	15	
Guayaba	15	1,0	Simple	46			1,70
		4	Compuesto	15	15	15	

(Continúa)

(Continuación)

Lulo	12	1,4	Compuesto	24	24		1,51
		5,6	Compuesto	15	15	15	
Mora	8	3	Compuesto	24	24		5,76
		40	Compuesto	15	15	15	
Tomate de árbol	12	5	Simple	46			5,19
		8,4	Compuesto	15	15	15	
		2	Compuesto	24	24		
Total							933,91

Una vez calculada la cantidad total de fertilizante nitrogenado en forma de urea se determinaron las emisiones de CO₂ mediante la Ecuación A1.22. Para la cual se empleó adicionalmente un factor de emisión por defecto [0,20 Gg C. Gg CO(NH₂)₂⁻¹] establecido por las directrices del IPCC (2006).

Ecuación A1.22

$$CO_2 \text{ Emisión} = \frac{M * FE * \frac{44}{12}}{10^3}$$

Donde:

CO₂ **Emisión**= Emisiones anuales de CO₂ por aplicación de urea (Gg C. Año⁻¹)

M= Cantidad anual de fertilización con urea (ton CO(NH₂)₂.Año⁻¹)

FE= factor de emisión [Gg C. Gg CO(NH₂)₂⁻¹]

44/12= Factor de conversión para convertir las emisiones de CO₂-C en CO₂

10³= Factor de conversión de toneladas (ton) a gigagramos (Gg) de urea [Gg CO(NH₂)₂.ton CO(NH₂)₂⁻¹]

Emisiones directas de N₂O en suelos gestionados

Para estimar las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados en el municipio de Cali durante 2010 se empleó una metodología de cálculo de Nivel I según lo mencionado por el IPCC (2006). El cual argumenta que cuando hay un incremento del nitrógeno disponible

en el suelo aumentan las tasas de nitrificación y desnitrificación que a su vez incrementa la producción de N₂O. Por tal motivo, se incluyeron en el inventario de Cali las siguientes fuentes de nitrógeno para estimar las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados:

- Fertilizantes de nitrógeno sintético (F_{SN})
- Nitrógeno orgánico aplicado como fertilizante (estiércol animal) (F_{ON})
- Nitrógeno de la orina y el estiércol depositado en pasturas por animales de pastoreo (F_{PRP})
- Nitrógeno en residuos agrícolas (F_{CR})
- La mineralización de nitrógeno relacionada con la pérdida de materia orgánica carbonacea del suelo como resultado de la gestión de suelos minerales (F_{SOM})

Las directrices del IPCC (2006) enfatizan en que se debe incluir el nitrógeno procedente de la gestión de suelos orgánicos o histosoles (FOS). Sin embargo, para el municipio de Cali esta fuente de nitrógeno no fue considerada, debido a que luego de analizar el mapa de órdenes de suelos para este municipio se determinó que los más representativos en una escala de 1:1.500.000 correspondían a Entisoles e Inceptisoles (IGAC y CVC, 2004).

En la Ecuación A1.23, se muestra de forma general la expresión matemática para determinar las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados considerando los aspectos mencionados anteriormente.

Ecuación A1.23

$$N_2O_{Directas} - N = \left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) * FE_1 \right] + \left[F_{PRP,CPP} * FE_{PRP3,CPP} \right] * \frac{44}{28}$$

Donde:

$N_2O_{Directas}$ -N= Emisiones directas anuales de óxido nitroso a partir de suelos gestionados (kg N_2O .Año⁻¹)

F_{SN} = Cantidad anual de nitrógeno aplicado a suelos en forma de fertilizante sintético (kg N.Año⁻¹)

F_{ON} = Cantidad anual de estiércol animal aplicada a los suelos (Kg N.Año⁻¹)

F_{CR} = Cantidad anual de nitrógeno en residuos agrícolas que se regresan a los suelos (kg N.Año⁻¹)

F_{SOM} = Cantidad anual de nitrógeno en suelos minerales que se mineraliza (kg N.Año⁻¹)

$F_{PRP,CPP}$ = Cantidad anual de nitrógeno de la orina y el estiércol depositada por animales de pastoreo (kg N.Año⁻¹)

FE_1 = Factor de emisión para emisiones de óxido nitroso de aportes de nitrógeno (0,01 kg N_2O -N. kg aporte de N⁻¹)

$FE_{PRP3,CPP}$ = Factor de emisión para N_2O del N de la orina y estiércol (0,02 kg N_2O -N. kg aporte de N⁻¹)

44/28= Factor de conversión de emisiones de N_2O -N a emisiones de N_2O

Fertilización de nitrógeno sintético (F_{SN}). Se refiere a la cantidad anual de fertilizante sintético de nitrógeno aplicado a los suelos, y para estimar su valor se accedió a la información dispuesta en la página de la Gobernación del Valle en lo que respecta a los Costos Agrícolas de cultivos transitorios, permanentes, hortalizas y frutales, entre otros; para el municipio de Cali en 2010.

El procedimiento de cálculo para estimar F_{SN} fue similar al realizado en la categoría de “**Emisiones de CO₂ por aplicación de fertilizantes nitrogenados**”, solo que en este caso se reporta la cantidad anual de fertilizante sintético en términos de nitrógeno (Gg N) y no de urea [ton CO(NH₂)₂] como previamente se había estimado (Ver Cuadro A1.24). Con base en esto se empleó la Ecuación A1.24 para calcular el valor de F_{SN} .

Ecuación A1.24

$$F_{SN} = \frac{M}{10^3} * \frac{1}{F_{N-CO(NH_2)_2}}$$

Donde:

F_{SN} = Fertilización de nitrógeno sintético (Gg de N. Año⁻¹)

M= Cantidad de fertilizante aplicado en forma de urea (933,91 ton CO(NH₂)₂)

$F_{N-CO(NH_2)_2}$ = Factor de conversión de nitrógeno a urea [2,143 Gg CO(NH₂)₂. Gg N⁻¹]

Nitrógeno orgánico aplicado como fertilizante (estiércol animal) (F_{ON}). Hace referencia a la cantidad de aportes de nitrógeno aplicada a los suelos que no provengan de animales en pastoreo (ganado lechero y no lechero, caprinos, equinos, mulares y asnares), porque de acuerdo con las directrices IPCC (2006) el nitrógeno proveniente de esta categoría de ganado se incluye dentro de la orina y el estiércol depositado en pasturas por animales de pastoreo (F_{PRP}).

Para estimar la cantidad de nitrógeno orgánico (F_{ON}) mediante las directrices del IPCC (2006) solo se consideraron los siguientes aspectos: i) cantidad de cabezas de ganado, ii) promedio anual de excreción de nitrógeno por animal, iii) fracción de la excreción total anual de nitrógeno gestionado y, iv) fracción de nitrógeno del estiércol gestionado, que se pierde según la categoría de ganado y el sistema de gestión de estiércol.

El IPCC (2006) indica que para estimar el valor de F_{ON} no solo deben considerarse los aspectos mencionados anteriormente, sino que también debe tenerse en cuenta por ejemplo: i) la cantidad anual de nitrógeno de compost aplicada a los suelos, y ii) la fracción del estiércol gestionado utilizado como combustible y en construcción. Sin embargo,

debido a la poca disponibilidad de información respecto a estos temas, se asumió que en el municipio de Cali no se utiliza el estiércol gestionado como combustible y en construcción, por lo que en la expresión matemática para calcular F_{ON} estos tomaron un valor igual a cero.

La Ecuación A1.25 muestra la forma de determinar la cantidad de nitrógeno orgánico aplicado como fertilizante.

Ecuación A1.25

$$F_{ON} = N_{(T)} * N_{ex(T)} * MS_{(T,S)} * \left(1 - \frac{Frac_{Pérdida MS}}{100}\right)$$

Donde:

F_{ON} = Cantidad total anual de fertilizante de nitrógeno orgánico aplicada a los suelos, excepto el de animales en pastoreo (Kg N. Año⁻¹)

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas (población) de la categoría de ganado T del municipio de Cali

$N_{ex(T)}$ = Promedio anual de excreción de nitrógeno por animal de la categoría de ganado T (Kg N. Animal⁻¹. Año⁻¹)

$MS_{(T,S)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada categoría de ganado T, que se gestiona en el sistema de gestión de estiércol S (adimensional)

$Frac_{Pérdida MS}$ = Cantidad de nitrógeno del estiércol gestionado para la categoría de ganado T que se pierde en el sistema de gestión de estiércol S (%)

S = Sistema de gestión de estiércol (pasturas, corral de engorde, manejo de sólidos y distribución diaria, entre otros)

T = Categoría de ganado

En la Ecuación A1.25 los valores de $N_{(T)}$ se asignaron de acuerdo a los datos de la población pecuaria (vacas lecheras, búfalo, ovinos, equinos y aves de corral, entre otros) presentes en Cali durante el año 2010, mientras que los valores de $N_{ex(T)}$, $MS_{(T,S)}$ y $Frac_{Pérdida MS}$ se calcularon y fijaron por defecto según las recomendaciones del IPCC (2006).

Nitrógeno de la orina y el estiércol depositado en pasturas por animales de pastoreo (F_{PRP}). Según el IPCC (2006) esta variable hace referencia a la cantidad anual de nitrógeno que se deposita en suelos de pasturas, prados y praderas por animales de pastoreo. Para estimar el valor de la variable F_{PRP} se tuvo en cuenta la siguiente información: i) cantidad de animales por categoría de ganado, ii) cantidad promedio anual de nitrógeno excretado por categoría de ganado y, iii) la fracción de nitrógeno que se deposita en suelos de pasturas, prados y praderas por cada categoría de ganado.

La Ecuación A1.26 muestra la fórmula matemática para calcular el valor del nitrógeno de la orina y estiércol depositado en pasturas por animales de pastoreo.

Ecuación A1.26

$$F_{PRP} = \sum_T \left[\left(N_{(T)} * N_{ex(T)} \right) * MS_{(T,PRP)} \right]$$

Donde:

F_{PRP} = Cantidad anual de nitrógeno de la orina y el estiércol depositada en pasturas, prados y praderas por animales en pastoreo (Kg N. Año⁻¹)

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas de ganado de la categoría T del municipio de Cali

$N_{ex(T)}$ = Promedio anual de excreción de N por cabeza de la categoría de ganado T (Kg N. Animal⁻¹. Año⁻¹)

$MS_{(T,PRP)}$ = Fracción del total de la excreción anual de nitrógeno de cada categoría de ganado T que se deposita en pasturas, prados y praderas (adimensional)

T = Categoría de ganado

Es importante tener en cuenta que en la Ecuación A1.26 los valores de $N_{(T)}$ se asignaron de acuerdo a los datos de la población pecuaria (vacas lecheras, búfalo, ovinos, equinos y aves de corral entre otros) presentes en Cali durante el 2010, mientras que los valores de $N_{ex(T)}$ y $MS_{(T,PRP)}$ se calcularon y fijaron por defecto según las recomendaciones del IPCC (2006).

Nitrógeno de residuos agrícolas (F_{CR}). El término F_{CR} determina tanto la cantidad de nitrógeno contenida en residuos agrícolas (aéreos y subterráneos) como el correspondiente a cultivos fijadores de nitrógeno que se devuelve a los suelos anualmente (IPCC, 2006). Para su estimación, básicamente se tuvo en cuenta información relacionada con las estadísticas de área cosechada y rendimiento de cultivos agrícolas según las Evaluaciones Agropecuarias de Cali (Gobernación del Valle, 2010); y factores por defecto de relaciones residuo-rendimiento aéreo/subterráneo y contenido de nitrógeno de los residuos de acuerdo con el IPCC (2006).

El primer paso que se llevó a cabo para determinar el valor de F_{CR} consistió en realizar una clasificación de los cultivos agrícolas en dos grupos: i) hortalizas y ii) legumbres fijadores de nitrógeno. En el primer grupo se incluyó la cebolla larga, mientras que en el segundo se incorporaron el frijol de ladera y plana, arveja y habichuela.

Una de las razones por las cuales se incluyeron los cultivos de frijol, arveja, habichuela y cebolla larga se debe a que estos cultivos aportan de manera directa nitrógeno al suelo, gracias a la simbiosis entre este tipo de cultivos y microorganismos fijadores de nitrógeno tales como el *Rhizobium*-Leguminosas (Baca et al., 2000; IFA y FAO, 2002; Patiño, 2014).

El Cuadro A1.25 muestra la información correspondiente a las áreas cosechadas y rendimientos de cultivos agrícolas para determinar el valor del nitrógeno de residuos agrícolas.

Teniendo en cuenta la información del Cuadro A1.25 se procedió a calcular el valor del nitrógeno de residuos agrícolas mediante la Ecuación A1.27. La cual considera como variables de entrada el área cosechada y rendimiento en fresco de cultivos agrícolas, y otras variables de interés (fracción de materia seca, contenido de nitrógeno de los residuos aéreos y subterráneos, factor de combustión etc.) que se establecieron por defecto de acuerdo con las directrices del IPCC (2006).

Cuadro A1.25. Área cosechada y rendimiento de cultivos agrícolas.

Grupo	Tipo de cultivo	Área cosechada (ha)	Rendimiento en fresco (Kg.ha ⁻¹)
Granos y legumbres fijadores de nitrógeno	Frijol de ladera	15	1,00
	Frijol plana	5	2,00
	Arveja	10	2,50
	Habichuela	18	7,25
	Cebolla larga	11	9,00

Ecuación A1.27

$$F_{CR} = \sum_T \left\{ \left(Cultivo_{(T)} * SECO \right) * \left(Superf_{(T)} - Superf_{quemada_{(T)}} * C_f \right) * \left[R_{AG(T)} * N_{AG(T)} * \left(1 - Frac_{Remoc(T)} \right) + \left(R_{BG(T)} * N_{BG(T)} \right) \right] \right\}$$

Donde:

F_{CR} = Cantidad anual de nitrógeno en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de nitrógeno devueltos a los suelos ($\text{Kg N} \cdot \text{Año}^{-1}$)

$\text{Cultivo}_{(T)}$ = Rendimiento en fresco cosechado para el cultivo T ($\text{Kg peso fresco} \cdot \text{ha}^{-1}$)

SECO = Fracción de materia seca del cultivo cosechado T ($\text{Kg d.m. Kg peso fresco}^{-1}$)

$\text{Superf}_{(T)}$ = Total de superficie anual de cosecha del cultivo T ($\text{ha} \cdot \text{Año}^{-1}$)

$\text{Superf. quemada}_{(T)}$ = Superficie anual del cultivo T quemada ($\text{ha} \cdot \text{Año}^{-1}$)

C_f = Factor de combustión (adimensional)

$R_{AG(T)}$ = Relación entre la materia seca de los residuos aéreos ($AG_{DM(T)}$) y el rendimiento de cosecha del cultivo T ($\text{Cultivo}_{(T)}$) ($\text{Kg d.m. Kg d.m}^{-1}$)

$N_{AG(T)}$ = contenido de nitrógeno de los residuos aéreos del cultivo T (Kg N. Kg d.m^{-1})

$\text{Frac}_{\text{Remoc}(T)}$ = fracción de los residuos aéreos del cultivo T que se extraen anualmente como los destinados a alimentos, camas y construcción ($\text{Kg N. Kg cultivo} \cdot \text{N}^{-1}$). Teniendo en cuenta que no se dispone de datos localmente respecto a $\text{Frac}_{\text{Remoc}(T)}$ se asume que no hay remoción.

$R_{BG(T)}$ = relación entre residuos subterráneos y rendimiento de cosecha del cultivo T ($\text{Kg d.m. Kg d.m}^{-1}$)

$N_{BG(T)}$ = contenido de nitrógeno de los residuos subterráneos del cultivo T (Kg N. Kg d.m^{-1})

Finalmente, cabe tener en cuenta que para todos los cultivos agrícolas los parámetros $\text{Superf. quemada}_{(T)}$ y C_f toman un valor igual a cero, debido a que en el municipio de Cali solo se tiene conocimiento de prácticas agrícolas (eventos) relacionadas con la quema de caña de azúcar.

Mineralización de nitrógeno relacionada con la pérdida de materia orgánica carbonacea del suelo como resultado de la gestión de suelos minerales (F_{SOM}). El término F_{SOM} se refiere a la cantidad de nitrógeno mineralizado, debido a la pérdida de carbono orgánico del suelo por cambios en el uso de la tierra o prácticas de gestión (IPCC, 2006).

De acuerdo con Smith y Conen (2004) los cambios en el uso de la tierra o prácticas de gestión pueden tener un impacto significativo sobre el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, porque tanto el carbono como el nitrógeno orgánico están íntimamente ligados con la materia orgánica del suelo. De modo que por cada pérdida de carbono del suelo por oxidación debido a cambios en el uso o gestión de la tierra, esta irá acompañada por una simultánea mineralización de nitrógeno, y posteriormente constituirá una fuente disponible para su conversión a N_2O .

Para estimar el valor de F_{SOM} , teniendo en cuenta las directrices del IPCC (2006), fue indispensable contar con información del tipo de orden de suelos en el municipio de Cali, esto con el objetivo de definir la existencia de suelos minerales (entisoles, inceptisoles, molisoles y andisoles) y suelos orgánicos (histosoles) en el municipio. Por tal motivo, se accedió a la información dispuesta por el IGAC (2008a) y se obtuvo el mapa de suelos que se presenta en la Figura A1.8.

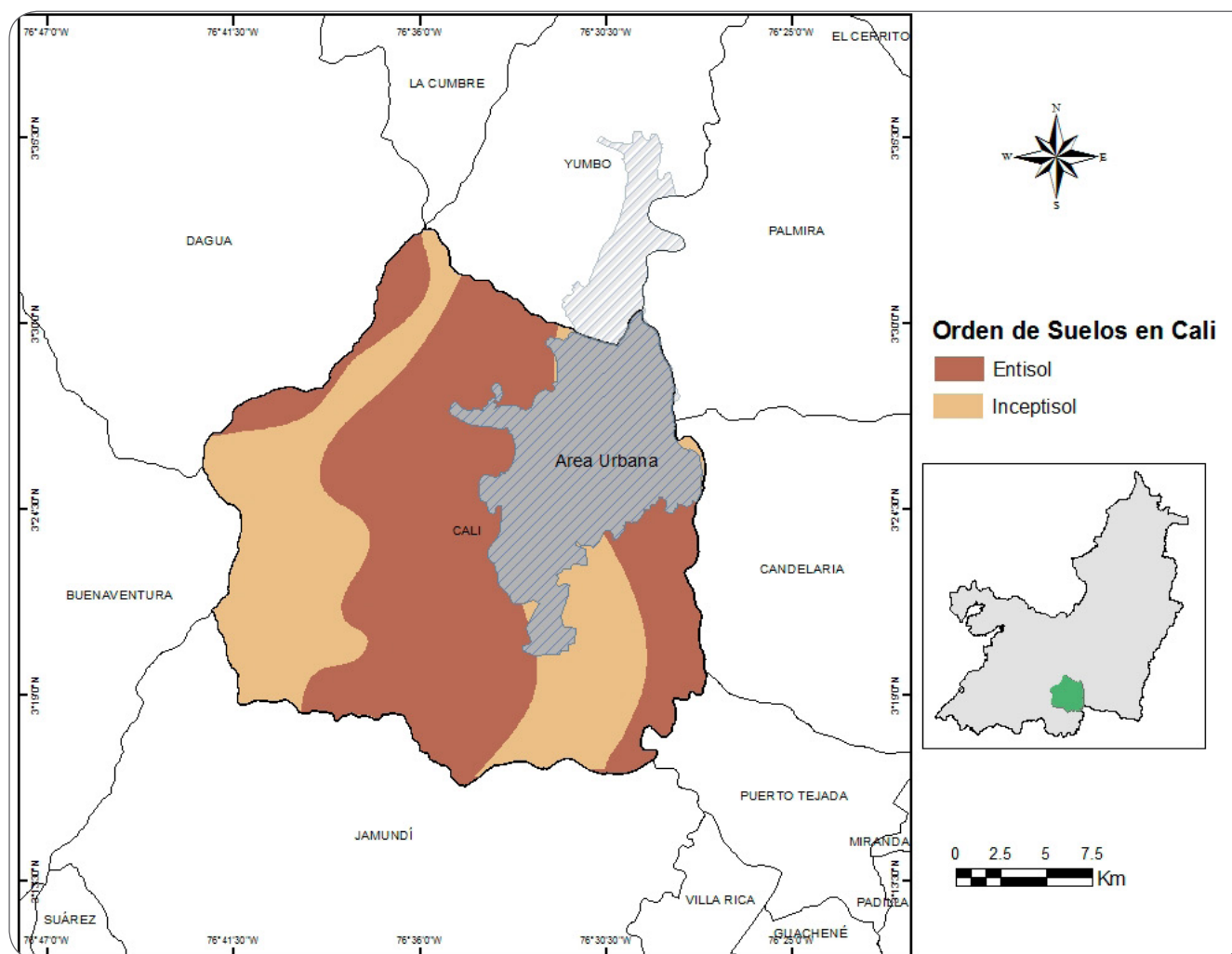


Figura A1.8. Orden de suelos en el municipio de Cali.

Fuente: IGAC (2008a).

La Figura A1.8. indica que bajo una escala de 1:1.500.000 se presentan dos tipos de suelos (entisol e inceptisol) en el municipio de Cali, en donde según el IGAC y CVC (2004) los primeros se caracterizan por presentar un desarrollo incipiente debido a que no tienen horizontes genéticos; mientras que en los segundos se agrupan todos los suelos que presentan una evolución pedogenética tal, que permite el desarrollo de uno o más horizontes diagnósticos con poca acumulación de materiales translocados y con suficientes minerales fácilmente intemperizables.

En razón a lo anterior, se puede deducir que el valor de F_{SOM} a calcular si corresponde a la cantidad de nitrógeno que se mineraliza debido a la pérdida de materia orgánica carbonácea del suelo como resultado

de las prácticas agrícolas (gestión de suelos minerales) que se desarrollan en el municipio de Cali.

Para determinar F_{SOM} también se realizó una descripción y clasificación de las diferentes zonas (regiones) climáticas del municipio, ya que la mineralización del nitrógeno en suelos minerales es un proceso fuertemente influenciado por el tipo de clima que se presente en un país, departamento o municipio; y sobre esto también depende la elección de algunos parámetros (F_{LU} , F_{MG} y FI) necesarios para la determinación de F_{SOM} . Por esto, se accedió a la información cartográfica dispuesta por el IGAC (2008) en relación a la zonificación climática del municipio de Cali, tal como se muestra en la Figura A1.9.

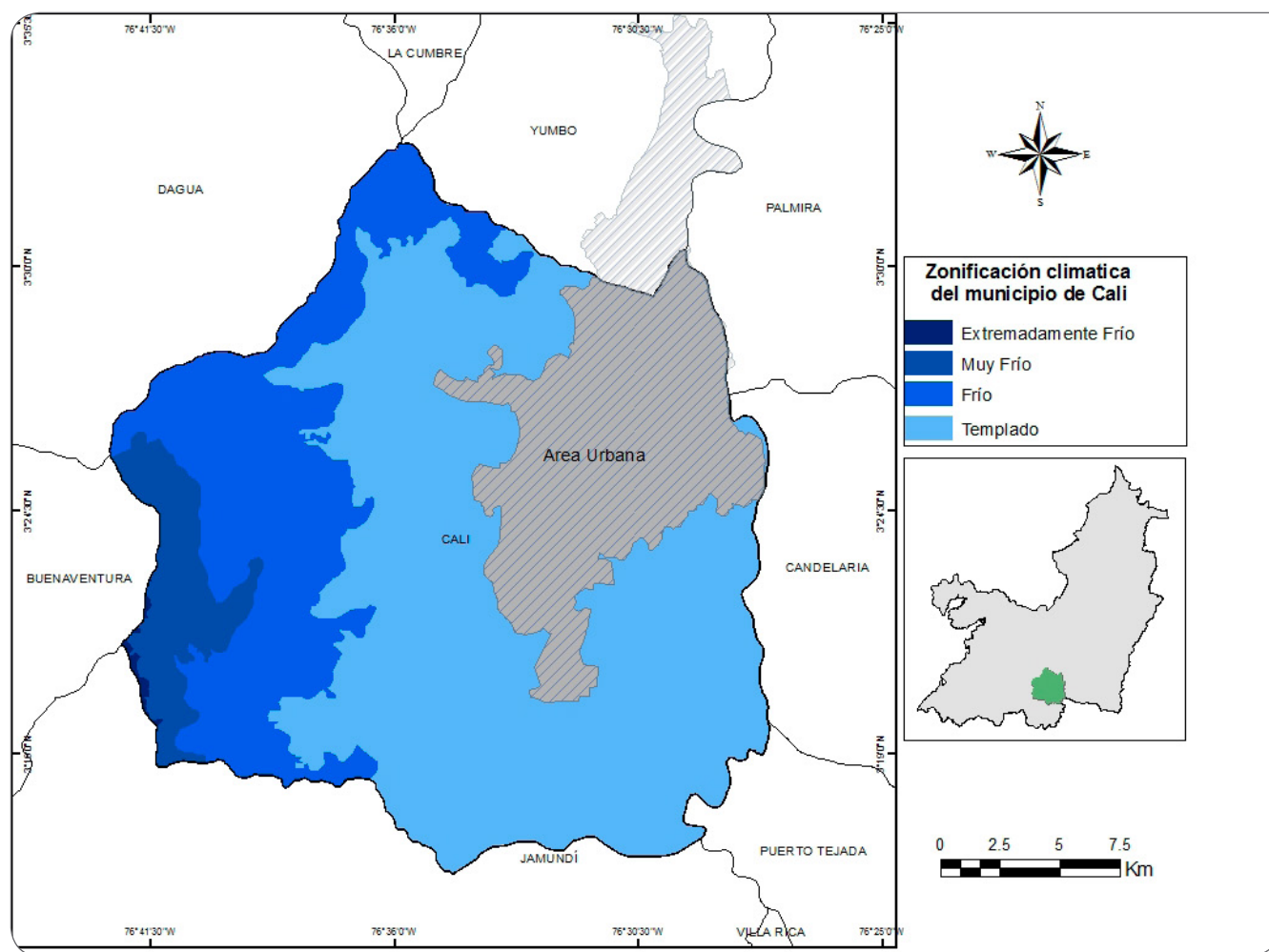


Figura A1.9. Zonificación climática del municipio de Cali.

Fuente: IGAC (2008b).

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a determinar los cambios en las existencias de carbono en suelos minerales tal como lo indica el IPCC (2006). Para esto se recopiló información cartográfica en relación a coberturas y usos del suelo en el municipio de Cali entre los años 2006 y 2010, con el fin de establecer si dentro de este período de inventario hubo prácticas de gestión en suelos minerales. La información cartográfica con que se trabajó en el período 2006–2010 se obtuvo a partir de la base de datos proporcionada por el IDEAM (2006) y la CVC (2010).

Para establecer si dentro del período de inventario se desarrollaron prácticas de gestión de suelos minerales, se organizó la información cartográfica con base en las categorías (tierras forestales, cultivo, pastizales, humedales y asentamientos) del uso de la tierra y regiones climáticas (templado frío, cálido y montano, entre otros) establecidas por el IPCC (2006). En este sentido, se muestra en la Figura A1.10 la manera como se agruparon las diferentes categorías del uso de la tierra teniendo en cuenta el tipo de suelo (entisol y inceptisol) y zonificación climática (templado cálido seco y templado frío seco) del municipio de Cali en el período de inventario 2006–2010.

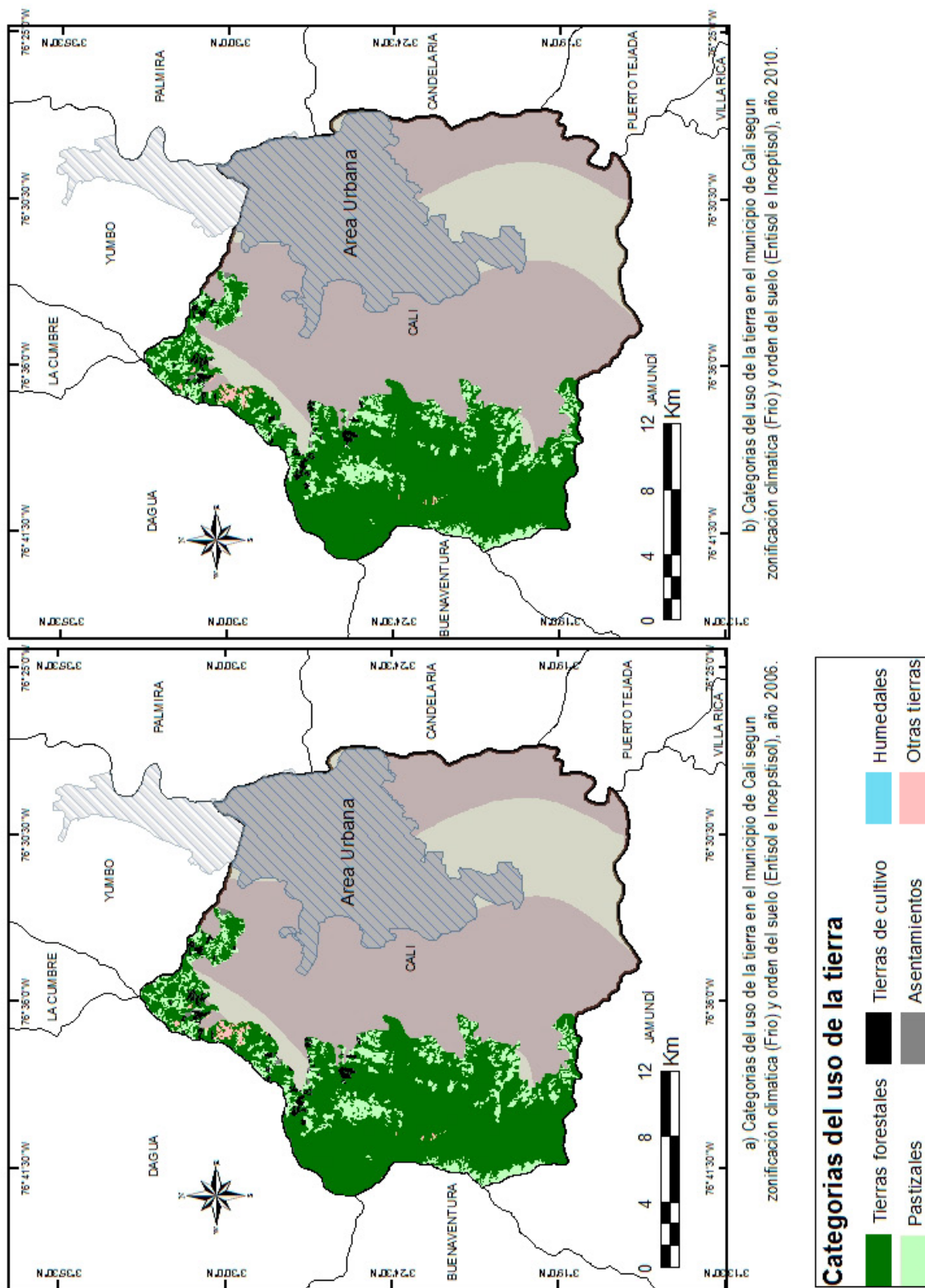


Figura A1.10a. Agrupación de categorías de uso de la tierra según la zona climática y el orden de suelos en 2006 y 2010.

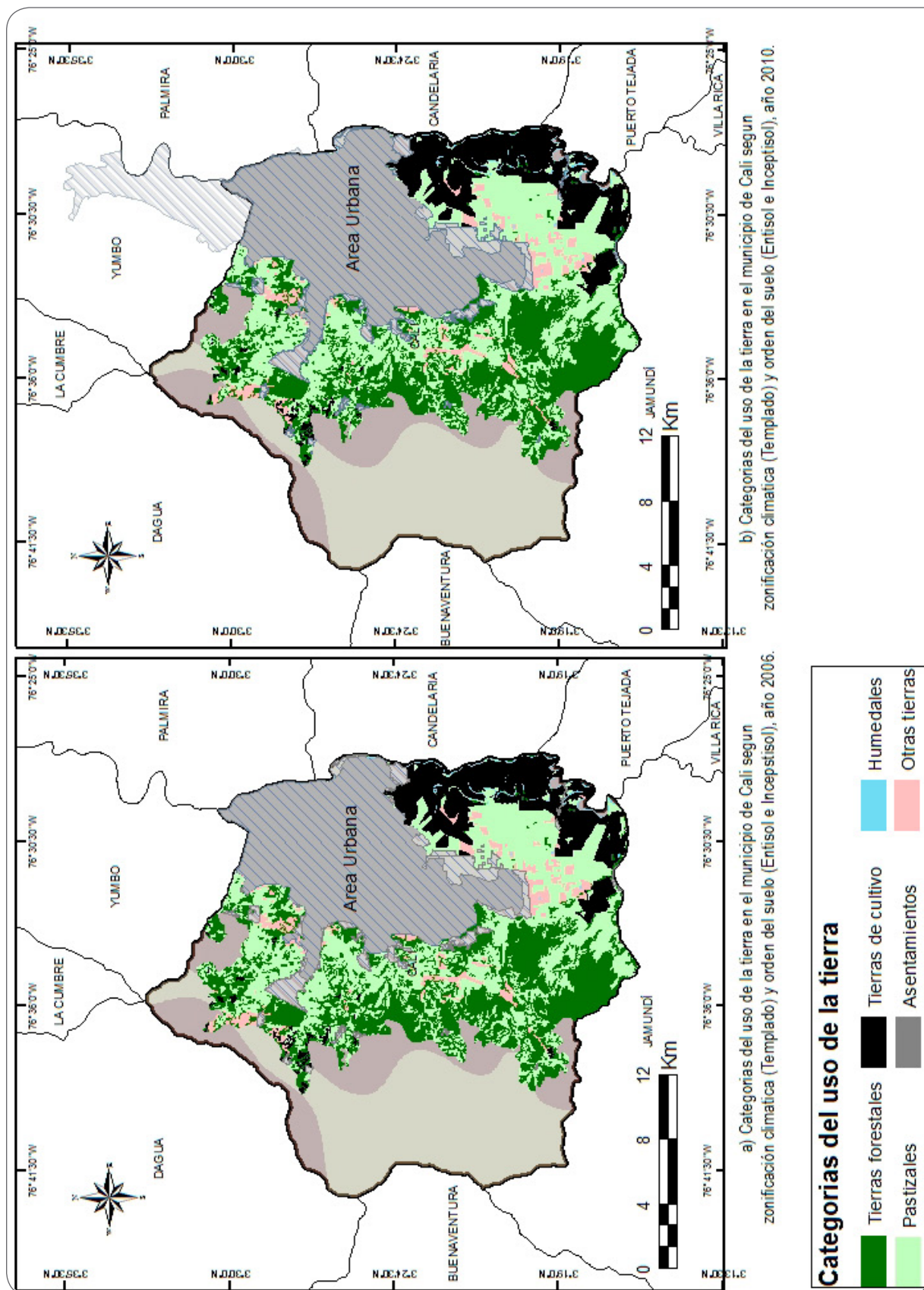


Figura A1.10b. Agrupación de categorías de uso de la tierra según la zona climática y el orden de suelos en 2006 y 2010.

A partir de la categorización del uso de la tierra en el municipio de Cali teniendo en cuenta la zonificación climática (frío y cálido) y orden de suelos (Entisol e Inceptisol), se sustrajo la información que se muestra en

los Cuadros A1.26 y A1.27 para identificar diferenciales de área (Δ) que permitieran reconocer los cambios en el uso del suelo durante el período de inventario (2006-2010).

Cuadro A1.26. Categorías y subcategorías del uso de la tierra según zonificación climática y orden de suelos en el municipio de Cali en el período de inventario 2006-2010.

Categoría del uso de la tierra	Templado frío			
	Año		Δ	Orden de suelos
	2006	2010		
	Área (ha)	Área (ha)	(ha)	
Tierras forestales				
Arbustal y matorral de tierra firme	891,9	887,4	-4,5	Inceptisol
Bosque natural de galería	0,9	0,9	0,0	Entisol
Bosque natural denso de tierra firme	12.078,6	12.075,7	-2,9	Entisol
Eucalipto	33,4	32,9	-0,6	Inceptisol
Pastizales totales				
Herbazal natural abierto mesófilo	293,0	307,3	14,3	Inceptisol
Pasto cultivado	2.459,7	2.458,0	-1,6	Entisol
Tierras de cultivo totales				
Café	50,6	50,2	-0,4	Entisol
Cultivos asociados	232,6	231,9	-0,6	Entisol
Maíz	5,0	4,9	-0,1	Entisol
Otros cultivos arbustivos plantados abiertos	1,5	1,5	0,0	Entisol
Otros cultivos arbustivos plantados densos	9,5	9,6	0,0	Entisol
Otros cultivos herbáceos plantados abiertos	10,7	10,7	0,0	Entisol
Otros cultivos herbáceos plantados densos	62,2	61,9	-0,3	Entisol

Cuadro A1.27. Categorías y subcategorías del uso de la tierra según zonificación climática y orden de suelos en el municipio de Cali en el período de inventario (2006-2010).

Categoría del uso de la tierra	Templado cálido			
	Año		Δ	Orden de suelos
	2006	2010		
	Área (ha)	Área (ha)	(ha)	
Tierras forestales				
Arbustal y matorral de tierra firme	3.008,3	3.011,4	3,1	Entisol
Bosque natural de galería	266,2	261,6	-4,6	Entisol
Bosque natural denso de tierra firme	5.854,0	5.887,8	33,8	Entisol
Eucalipto	155,2	155,7	0,6	Inceptisol
Pastizales totales				
Pasto cultivado	11.175,5	11.168,8	-6,7	Entisol
Pasto de corte	1,7	0,8	-0,9	Entisol
Tierras de cultivo totales				
Cacao	11,9	11,9	0,0	Entisol
Café	135,2	135,5	0,4	Entisol
Caña	3.986,9	3.978,3	-8,5	Entisol
Cultivos asociados	143,3	144,3	1,0	Entisol
Maíz	79,1	79,2	0,1	Entisol
Otros árboles frutales	140,4	139,7	-0,6	Entisol
Otros cultivos arbustivos plantados densos	20,7	20,6	-0,1	Inceptisol
Otros cultivos herbáceos plantados abiertos	6,2	6,2	0,0	Entisol
Otros cultivos herbáceos plantados densos	9,4	10,0	0,6	Inceptisol
Sorgo	298,8	297,6	-1,2	Inceptisol
Soya	0,3	0,2	-0,1	Entisol

Con base en la información del Cuadro A1.27 se empleó la Ecuación A1.28 para conocer los cambios en la existencia de carbono en suelos minerales. Sobre este punto, cabe mencionar que se consideraron como tierras gestionadas las correspondientes a tierras forestales, pastizales y cultivo. A su vez, los valores de existencias de

carbono de referencia (SOC_{REF}) y los factores de cambio de existencias (F_{LU} , F_{MG} y F_I) se fijaron de acuerdo a la zonificación climática, orden de suelos y categorías del uso del suelo que se identificaron en el municipio, tal como se muestra en el Cuadro A1.28.

Cuadro A1.28. Factores de existencias de carbono según la zonificación climática y el orden de los suelos.

Variables	Categorías del uso del suelo	Zona climática	Orden de suelos	Valor	Referencia
SOC_{REF}	Todas	Templado frío	Inceptisoles	50	IPCC (2006)
		Templado frío	Entisoles	34	
		Templado cálido	Inceptisoles	38	
		Templado cálido	Entisoles	19	
F_{LU}	Todas	Templado frío y cálido	Entisol e Inceptisol	1	
F_{MG}				1	
F_I				1	

Ecuación A1.28

$$\Delta C_{Minerales} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} * F_{LU_{c,s,i}} * F_{MG_{c,s,i}} * F_{I_{c,s,i}} * A_{c,s,i})$$

Donde:

$\Delta C_{Minerales}$ = Cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales (ton C.Año⁻¹)

SOC_0 = Existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario (ton C)

$SOC_{(0-T)}$ = Existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario (ton C)

SOC_{REF} = Existencias de carbono de referencia (ton C. ha⁻¹)

F_{LU} = Factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra o subsistemas de un uso de la tierra en particular (adimensional)

F_{MG} = Factor de cambio de existencias para el régimen de gestión (adimensional)

F = Factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica (adimensional)

A = Superficie de tierra del estrato que se estima según sus condiciones biofísicas (clima y tipo de suelo) (ha)

D = Cantidad de años de un período de inventario dado (años)

c = Representa las zonas climáticas (templado frío y cálido)

s = Representa el orden de los suelos (entisol e inceptisol)

i = Representa las categorías del uso de la tierra gestionadas (tierras forestales, pastizales y cultivos)

Luego de cuantificar $\Delta C_{Minerales}$ se empleó la Ecuación A1.29 para dar cuenta de la cantidad neta anual de nitrógeno mineralizado (F_{SOM}) debido a la pérdida de carbono del suelo por gestión de la tierra en el municipio de Cali durante el período de inventario 2006–2010.

Ecuación A1.29

$$F_{SOM} = \left(\Delta C_{Minerales} * \frac{1}{R} \right) * 1000$$

Donde:

F_{SOM} = Cantidad neta anual de nitrógeno mineralizado en suelos minerales debido a la pérdida de carbono del suelo por cambios en el uso o la gestión de la tierra (Kg N)

R = Relación Carbono: Nitrógeno de la materia orgánica del suelo; se adopta un valor de 15 por defecto (IPCC, 2006)

1000 = Factor de conversión de ton a kg de CO₂ (kg.ton⁻¹)

Emisiones indirectas de N₂O en suelos gestionados

La primera vía por medio de la cual se generan las emisiones indirectas de N₂O se debe a la volatilización de nitrógeno como amoníaco (NH₃) y óxido de nitrógeno (NO_x), y la deposición de estos gases y de sus productos (NH₄⁺ y NO₃⁻) sobre los suelos y superficies de agua (humedales, lagos y ríos). Mientras que en la segunda, las emisiones indirectas de N₂O son ocasionados por la lixiviación y escurrimiento desde la tierra de nitrógeno, de agregados de fertilizantes sintéticos y orgánicos, residuos agrícolas, mineralización de nitrógeno relacionada con la pérdida de carbono del suelo en suelos minerales drenados o gestionados por los cambios en el uso de la tierra o prácticas de gestión, y la deposición de orina y estiércol de animales en pastoreo (IPCC, 2006).

Por lo anterior, se cuantificaron las emisiones indirectas de N₂O mediante una metodología de cálculo de Nivel I de acuerdo a lo establecido por el IPCC (2006). La Ecuación A1.30 se empleó para estimar las emisiones de N₂O por volatilización, mientras que la Ecuación A1.31 se utilizó para dar cuenta de las emisiones de N₂O por lixiviación o escurrimiento. Se debe tener en cuenta que en estas ecuaciones los valores de los factores F_{SN}, F_{ON}, F_{CR} y F_{SOM} son iguales a los determinados en el apartado “Emisiones directas de N₂O en suelos gestionados”, y que los factores de emisión adoptados (por defecto) de las directrices del IPCC (2006) corresponden a los mostrados en el Cuadro A1.29.

Cuadro A1.29. Factores de emisión, volatilización y lixiviación por defecto para emisiones indirectas de N₂O del suelo.

Factor	Valor
Volatilización y redeposición de nitrógeno (FE ₄)	0,010
Lixiviación/escurrimiento (FE ₅)	0,0075
Volatilización de fertilizante sintético (Frac _{GASF})	0,10
Volatilización de todos los fertilizantes de nitrógeno orgánicos aplicados, y de estiércol y orina depositados por animales en pastoreo (Frac _{GASM})	0,20
Pérdida de nitrógeno por lixiviación o escurrimiento (Frac _{lixiviación-(H)})	0,30

Ecuación A1.30

$$N_2O_{(ATD)} = \left[(F_{SN} * Frac_{GASF}) + ((F_{ON} + F_{PRP}) * Frac_{GASM}) \right] * (FE_4 * \frac{44}{28})$$

Donde:

N₂O_(ATD) = Cantidad anual de N₂O producida por deposición atmosférica de nitrógeno volatilizado de suelos gestionados (Kg N₂O. Año⁻¹)

Frac_{GASF} = Fracción de nitrógeno de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH₃ y NO_x (0,10 Kg N volatilizado. Kg N aplicado⁻¹)

Frac_{GASM} = Fracción de materiales fertilizantes de nitrógeno orgánico (F_{ON}) y de nitrógeno de orina y estiércol depositada por animales de pastoreo (F_{PRP}) que se volatiliza como NH₃ y NO_x (0,20 Kg N volatilizado. Kg de N aplicado o depositado⁻¹)

FE₄ = Factor de emisión correspondiente a las emisiones de N₂O de la deposición atmosférica de N en los suelos y en las superficies de agua (0,010 Kg N-N₂O. (Kg NH₃-N + NO_x-N volatilizado)⁻¹)

44/28 = Factor de conversión de emisiones de N₂O-N a emisiones de N₂O

$$N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{PRP} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) * \left(Frac_{Lixiviación-(H)} * FE_5 * \frac{44}{28} \right)$$

Donde:

$N_2O_{(L)}$ = Cantidad anual de N_2O producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de nitrógeno a suelos gestionados ($Kg\ N_2O.Año^{-1}$)

$Frac_{Lixiviación-(H)}$ = Fracción de todo el nitrógeno agregado o mineralizado en suelos gestionados donde se produce lixiviación o escurrimiento ($0,30\ Kg\ N. Kg\ de\ agregados\ de\ N^{-1}$)

FE_5 = Factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento de nitrógeno ($0,0075\ Kg\ N_2O. Kg\ N\ por\ lixiviación\ y\ escurrimiento^{-1}$)

Desechos

El módulo de desechos estima las emisiones de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y dióxido de carbono (CO_2) procedentes de las siguientes categorías: eliminación de desechos sólidos, tratamiento biológico de los desechos sólidos, incineración e incineración abierta de desechos y tratamiento y eliminación de aguas residuales (IPCC, 2006). Dichas emisiones de GEI se deben principalmente a procesos de descomposición de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos, en las aguas residuales domésticas e industriales y los procesos de nitrificación y desnitrificación que en ellas ocurre. En este sentido se presentan en la Figura A1.11 las categorías contempladas en este inventario para el municipio de Santiago de Cali.

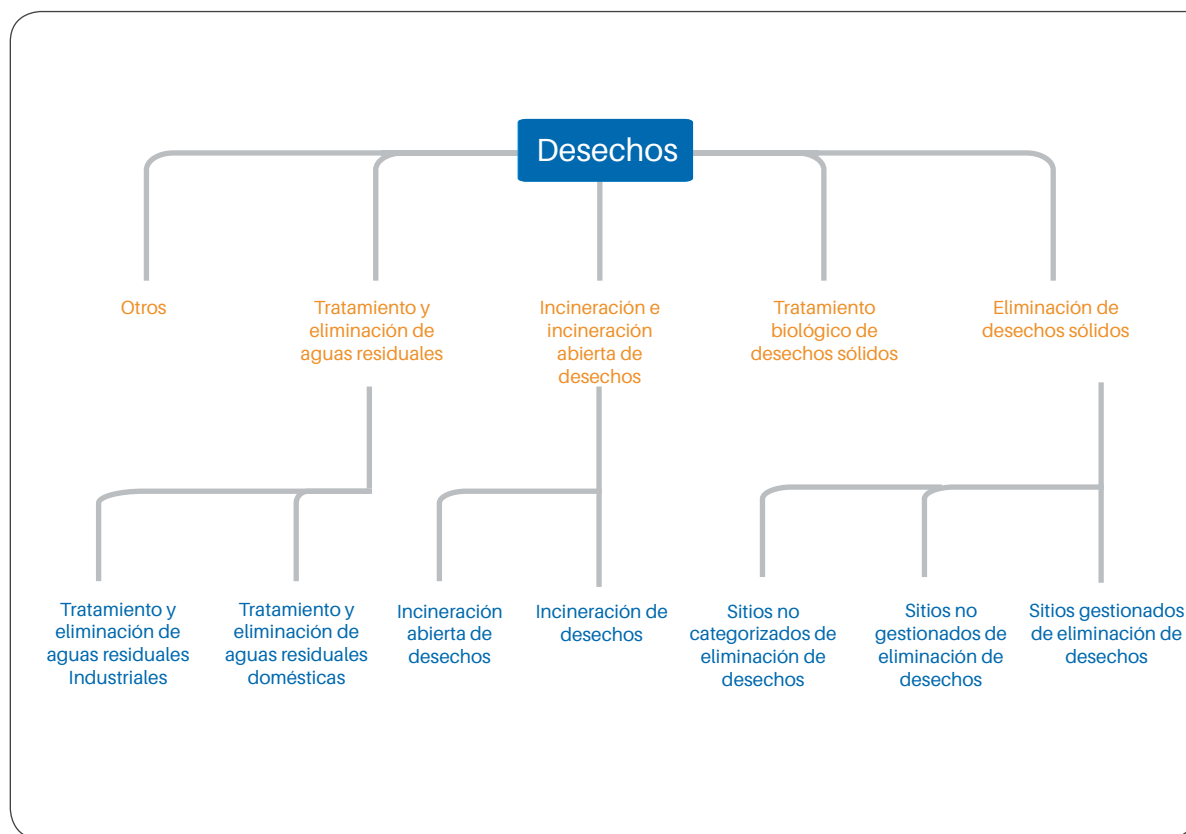


Figura A1.11. Categorías módulo de residuos.

Fuente: Elaboración con base en IPCC (2006).

Residuos sólidos

Disposición en tierra de residuos sólidos

- Método de estimación: Para cuantificar las emisiones de metano procedentes del sitio de disposición final de los residuos sólidos en el municipio de Santiago de Cali, se empleó una metodología de cálculo Nivel I, descrita en las directrices del IPCC (2006).

Los Cuadros A1.30 y A1.31 muestran la información necesaria para el cálculo de las emisiones de metano procedentes del sitio de disposición final, y los factores de emisión empleados para el mismo.

Cuadro A1.30. Datos de la actividad requeridos para el cálculo de las emisiones de CH₄ procedentes del sitio de disposición final.

Información	Cantidad	Fuente
Total anual de residuos sólidos dispuestos en tierra	500.173 ton	Alcaldía de Santiago de Cali (2014)
Composición de los residuos sólidos urbanos	Ver Cuadro A1.31 y A1.32	Alcaldía de Santiago de Cali (2006)
Porcentaje de recuperación de residuos sólidos al año	5%	EMSIRVA (2007)
Relleno sanitario	Yotoco Colomba El Guabal	Alcaldía de Santiago de Cali (2014)
Factores de Emisión		
Fracción de COD que se realmente se degrada (CODf)	0,5	IPCC (2006)
Fracción del carbono liberado como metano	0,5	IPCC (2006)
Fracción de corrección para el metano	0,717	MADT et al. (2008)
Relación de conversión de carbono a metano	16/12	IPCC (2006)

Cuadro A1.31. Caracterización porcentual (%) de los residuos sólidos residenciales en el municipio de Cali.

Tipo de residuo	Porcentaje (%)
Comida	59,00
Jardín	6,54
Papel	3,84
Cartón	2,39
Bolsas y empaques	6,93
Plástico soplado	3,21
Caucho y cuero	0,98
Textiles	1,98
Madera	0,62
Metálicos	1,06
Vidrio	2,56
Cerámicos	1,34
Huesos	0,30
Higiénicos	7,73
Otros	1,52

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali (2006).

De acuerdo con la caracterización porcentual de los residuos residenciales descritos, el porcentaje de reciclaje y las categorías del IPCC (2006), se consolidó

la composición de los residuos sólidos como se muestra en el Cuadro A1.32.

Cuadro A1.32. Composición porcentual (%) de residuos sólidos en Cali.

Tipo de residuo	Porcentajes (%)
Cartón	2,27
Caucho y cuero	0,98
Comida	59,00
Higiénicos	7,73
Jardín	6,54
Madera	0,62
Papel	2,65
Textiles	0,24

Es preciso resaltar que los factores de emisión seleccionados responden a las características específicas del relleno sanitario, razón por la cual el valor de la fracción de corrección para el metano se toma de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la CMNUCC. Una vez consolidada la información se operaron de acuerdo con la Ecuación A1.32 para determinar la fracción de carbono orgánico degradable en los residuos sólidos municipales eliminados.

Ecuación A1.32

$$DOC = \sum_i (COD_i * W_i)$$

Donde:

DOC= Fracción de carbono orgánico degradable en los desechos brutos Gg de C/Gg de desechos

COD_i= Fracción de carbono orgánico degradable en los desechos de tipo i

W_i= Fracción de tipo de desecho i por categoría de desecho

La fracción de carbono orgánico degradable en cada tipo de residuo se tomó de los valores dados por el IPCC (2006) para los inventarios nacionales de GEI.

Posteriormente se estimó el total neto de las emisiones de metano procedentes de esta categoría mediante la siguiente ecuación.

Ecuación A1.33

$$Emisiones CH_4 = (RSU_{2010} * FCM * COD * COD_f * F * \frac{16}{12} - R) * (1 - OX)$$

Donde:

RSU₂₀₁₀= Total anual de residuos sólidos urbanos dispuestos en tierra (Gg)

FCM= Factor de corrección para el metano (adimensional)

COD= Fracción de carbono orgánico degradable en los residuos sólidos

COD_f= Fracción de COD que realmente se degrada

F= Fracción del carbono liberado como metano

R= Recuperación anual de metano

OX= Factor de corrección para la oxidación del metano

Incineración de desechos

El municipio de Santiago de Cali incinera residuos sólidos mediante el operador Promambiental Cali S.A. E.S.P. Sin embargo, estas incineraciones se hacen fuera del municipio, razón por la cual esta categoría no fue cuantificada. A continuación se describen las cantidades de residuos incinerados reportados y los lugares donde se llevó a cabo su disposición final (ver Cuadros A.1.33. y A.1.34).

Cuadro A1.33. Residuos del municipio de Santiago de Cali incinerados en el año 2010.

Residuos anatomopatológicos y cortopunzantes en el año 2010	Porcentaje (%)
Mes	Toneladas
Abril	14,38
Mayo	14,53
Junio	14,17
Julio	13,48
Agosto	14,91
Septiembre	8,77
Octubre	10,99
Noviembre	11,09
Diciembre	12,70
Total	115,03

Fuente: EMSIRVA E.S.P. (2010).

Cuadro A1.34. Operadores encargados y autorizados para incinerar en el año 2010.

Nombre	Ubicación
ASERHI LTDA	Popayán
RH S.A. E.S.P.	Yumbo

Fuente: EMSIRVA E.S.P. (2010).

Tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas

Emisiones de metano procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas

- Método de estimación: La estimación de emisiones de metano por aguas residuales se realizó para 10 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicadas en el municipio de Santiago de Cali. A continuación se presenta una descripción de las unidades que conforman cada una de estas y la fuente de la información.

Cuadro A1.35. Plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Santiago de Cali.

Zona	Nombre PTAR	Unidades	Fuente
Rural	Pueblo Nuevo	Tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente y filtro Fito pedológico.	CVC (2010)
	Cabecera (Buitrera)	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	La Leonera	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	Pance	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	La Vorágine	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	Saladito	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	Villa Carmelo	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	
	Felidia	Tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.	Ferro (2012)
Urbana	El Caney	Módulo de biodiscos, pozo de bombeo, vertedero, desarenador, trampa de grasas, tanque de aireación, tanque sedimentador y lechos de secado	DAGMA (2006)
	Cañaveralejo	Rejillas, desarenadores, sedimentadores primarios, digestores anaeróbicos mesofílicos, producción de biogás y biosólido.	DAGMA y UAO (2013)

Una vez conocida la descripción de las unidades de cada sistema de tratamiento, se realizó una aproximación metodológica de Nivel II para ocho PTAR y de Nivel I para dos de ellas de la siguiente manera:

Bottom up – Nivel I: Mediante la información secundaria de población, porcentaje de alcantarillado para el municipio y la tasa de producción de carga de DBO₅ per cápita, se realizó la estimación de la carga anual (Kg DBO/año) operando dicha información como lo explica la ecuación A1.34.

Ecuación A1.34

Carga (Kg DBO/año) = (kgDBO₅) /
(hab. año)*(población*porcentaje de cobertura)

Bottom up – Nivel II: De acuerdo a la información de demanda biológica de oxígeno promedio (DBO₅) y caudal (Q) suministrada por la CVC, se estimó la carga anual de esta dada en kg DBO/año, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación A1.35

$$DBO_5 \frac{mg}{l} * Q \frac{l}{s} * \frac{1k}{1x10^6 mg} * \frac{86400seg}{1 día} * \frac{365 días}{1 año}$$

Cuadro A1.36. Información secundaria para estimación de DBO_5 en dos corregimientos de Santiago de Cali.

Variable		Valor	Fuente
Población	Saladito	1.080	Alcaldía de Santiago de Cali (2014)
	Villa Carmelo	916	
Porcentaje de cobertura de alcantarillado		35,30%	DANE (2005)
Carga per cápita ($kg DBO_5 \cdot habitante^{-1} \cdot día^{-1}$)		0,0346	CVC y Universidad del Valle (2007)

Teniendo en cuenta la información de los Cuadros A1.35 y A1.36, y los datos consolidados de carga anual de DBO_5 se estiman las emisiones de metano procedente de las aguas residuales domésticas mediante la ecuación A1.36.

Ecuación A1.36

$$Emisión\ de\ CH_4 = \frac{kg\ DBO_5}{año} * Bo \frac{kg\ CH_4}{kg\ de\ COD} * MCFj * 0.001$$

Donde:

Emisión de CH_4 = Emisión de metano en t $CH_4/año$

$kg\ DBO_5\ año$ = Carga anual de DBO_5

Bo = Capacidad máxima de producción de metano

$MCFj$ = Factor de corrección para el metano

Emisiones de óxido nitroso procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas

- Método de estimación para determinar las emisiones indirectas de óxido nitroso provenientes de las aguas residuales domésticas se utilizó la única metodología dada por el IPCC (2006). Los datos de la actividad requeridos son:

Cuadro A1.37. Datos para la estimación de óxido nitroso en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Variable	Valor	Fuente
Población	2.244.536	Alcaldía de Santiago de Cali (2014)
Promedio anual de generación de proteína per cápita ($kg\ persona^{-1} \cdot año^{-1}$)	22,63	FAO (2015)
Fracción de nitrógeno en las proteínas ($kg\ N\ kg\ proteína^{-1}$)	0,16	IPCC (2006)
Factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales	1,1	
Factor para las proteínas industriales y comerciales coeliminadas en los sistemas de alcantarillado	1,25	
Factor de emisión ($kg\ N_2O-N/kg\ N$)	0,005	
Conversión de $kg\ de\ N_2O-N$ en $kg\ de\ N_2O$	44/28	
Emisiones de las plantas de aguas residuales	0	

Una vez determinados los datos de la actividad se estimó el nitrógeno total en los efluentes mediante la Ecuación A1.37 y posteriormente las emisiones de óxido nitroso mediante la Ecuación A1.38.

Ecuación A1.37

$$N_{\text{efluente}} = (P * \text{proteína} * F_{\text{NPR}} * F_{\text{NON-CON}} * F_{\text{IND-COM}}) - N_{\text{lodo}}$$

Donde:

N efluente= Cantidad anual de N en los efluentes de aguas residuales kg de N/año

P= Población humana

Proteína= Consumo per cápita anual de proteínas kg persona.año

F_{NPR} = Fracción de nitrógeno en las proteínas kg.de N/kg.de proteína

$F_{\text{NON-CON}}$ = Factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales

$F_{\text{IND-COM}}$ = Factor para las proteínas industriales y comerciales coeliminadas en los sistemas de alcantarillado

Nlodo= Nitrógeno separado con el lodo residual kg de N/año

Ecuación A1.38

$$\text{Emisiones de } N_2O = N_{\text{efluente}} * EF_{\text{efluente}} * 44 / 28$$

Donde:

N efluente= Cantidad anual de N en los efluentes de aguas residuales kg de N/año

EF_{efluente} = Factor de emisión kg de N_2O /kg de N

44/28= Factor de conversión de kg de N_2O -N en kg de N_2O

Tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales

De acuerdo al “reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimiento puntual al alcantarillado público,” entregado por el DAGMA, se identificaron 11 industrias en el área urbana de Cali que presentan planta de tratamiento de aguas residuales al interior de sus instalaciones. Conjuntamente se realizó una revisión de los expedientes de gestión ambiental empresarial con el fin de determinar las unidades que conforman dicho sistema. Sin embargo, se encontró que los sistemas utilizados por estas industrias no poseen tratamiento anaerobio, razón por la cual no se calcula esta categoría.

En el Cuadro A1.38 se listan las industrias con PTAR junto con una breve descripción de las unidades que la conforman.

Cuadro A1.38. Empresas con sistema de tratamiento de aguas residuales propio en el municipio de Santiago de Cali.

Industria	Sistema de tratamiento de aguas residuales	Fuente
	Tipo de proceso	Unidades
Cadbury Adams	Químico	Cámara de inspección inicial, canaleta Parshall con medidor de flujo electromagnético, trampa de grasas, caja de válvulas para distribución y direccionamiento de flujo, unidad de homogenización con motoreductor, unidad para sólidos, tanque de neutralización, cámara de inspección de salida y entrega al alcantarillado municipal.
Cartones América	Físico-químico	Unidad de mezcla rápida con un agitador eléctrico, floculador piramidal de medio poroso, clarificador y trampa de grasas.
Coca Cola	No se especifica	No se especifica.
Colgate Palmolive	Físico-químico	Canastilla de filtro, tanque de homogenización, tanque para la coagulación y floculación y TK clarificador.

(Continúa)

(Continuación)

Industrias Cato	Físico-químico	Trampa de grasas, tanque de sedimentación, Baches 1000 litros.
Industrias del Maíz	Físico-químico	Trampa de grasas, tanque de neutralización y tanque de sedimentación.
Laboratorios Recamier	Físico-químico	Dos tanques de igualación, dos tanques de reacción, tanque de contacto con hipoclorito, celda de flotación, tanque de almacenamiento de lodos, filtro de prensa.
Lloreda S.A.	Físico-químico	Tanque de floculación, tanque de coagulación y filtro de prensa.
Renckitt Benkiser	Físico-químico	Trampa de sólidos, trampa de grasas, cámara de control de pH.
Sanofi Aventis	Físico-químico	Trampa de sólidos, trampa de grasas, entre otras.
Unilever Andina de Colombia	Físico-químico	Trampa de grasas, tanque de neutralización y sedimentador.

Emisiones de metano (CH₄) generadas por la eliminación de residuos sólidos en el relleno sanitario de Navarro

Las emisiones de CH₄ en el relleno sanitario se estimaron con base en el modelo de primer orden descrito por el IPCC (2006), el cual argumenta que para su aplicación se requiere de información relacionada con: i) cantidad, ii) composición, iii) fracción de carbono orgánico por residuo, iv) fracción de carbono orgánico degradable

que se descompone bajo condiciones anaerobias, v) factor de corrección del CH₄ y, iv) parámetros cinéticos como el *tiempo de vida media* de los residuos sólidos.

En cuanto a la cantidad de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario de Navarro, cabe indicar que se logró consolidar una base de datos para seis años consecutivos desde el 2003 hasta el 2008, tal como se presenta en el Cuadro A1.39.

Cuadro A1.39. Cantidades de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario de Navarro en el periodo 2003–2008.

Año	Cantidad de residuos dispuestos (Gg)
2003	624,31
2004	478,41
2005	574,74
2006	613,36
2007	554,10
2008	263,10

En relación a la composición de residuos sólidos solo se logró recopilar información para el año 2006 y se trabajó de forma constante en el modelo, debido a la carencia de información. En lo que respecta al contenido (fracción) de carbono orgánico por tipo de residuo (alimentos,

desechos de jardines o parques, papel y cartón, madera, textiles, etc.) cabe señalar que se tomaron los valores por defecto establecidos por el IPCC (2006), como se muestra en el Cuadro A1.40.

Cuadro A1.40. Caracterización física y química de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario de Navarro.

Tipo de residuo	Composición física de los residuos dispuestos en base húmeda (%)	Fracción de carbono orgánico de los residuos dispuestos en base húmeda (Sin dimensiones)	Referencias
Cartón	2,27	0,4	Alcaldía de Santiago de Cali (2006) e IPCC (2006)
Caucho y cuero	0,98	0,39	
Comida	59,00	0,15	
Higiénicos	7,73	0,24	
Jardín	6,54	0,20	
Madera	0,62	0,43	
Papel	3,65	0,4	
Textiles	1,98	0,24	

Finalmente, para la fracción de carbono orgánico degradable que se descompone bajo condiciones anaerobias y el factor de corrección de CH_4 se adoptaron valores de acuerdo a las directrices del IPCC

(2006), y a los reportados por Pedraza y Saldarriaga (2009) respectivamente, los cuales se presentan en el Cuadro A1.41.

Cuadro A1.41. Caracterización química de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario de Navarro

Parámetro	Valor	Referencia
Fracción de carbono orgánico que se descompone bajo condiciones anaerobias (sin dimensiones)	0,5	IPCC (2006)
Factor de corrección de CH_4 (sin dimensiones)	0,717	Pedraza y Saldarriaga (2009)

El IPCC (2006) indica que la variable de entrada más importante al modelo de primer orden es la cantidad de materia orgánica degradable (DDOC_m) contenida en los residuos sólidos dispuestos. Esta variable se calcula como el producto entre la cantidad de residuos (W), fracción de carbono orgánico degradable contenido en los desechos (DOC), fracción de carbono orgánico degradable que se descompone bajo condiciones anaeróbicas (DOC_f) y el factor de corrección de CH₄ (MCF), como se expresa en la Ecuación A1.39.

Ecuación A1.39

$$DDOC_{mdiT} = W_T * (DOC_i * w_i) * DOC_f * MCF$$

Donde:

DDO_{CmdiT} = Cantidad de materia orgánica degradable en los residuos dispuestos de tipo i en el año T (Gg)

W_T = Cantidad de residuos sólidos dispuestos en el año T (Gg)

DOC_i = Fracción de carbono orgánico en los residuos dispuestos de tipo i en base húmeda (Sin dimensiones)

w_i = Composición de los residuos dispuestos en base húmeda (%)

DOC_f = Fracción de carbono orgánico que se descompone bajo condiciones anaerobias (Sin dimensiones)

MCF = Factor de corrección de CH₄ (Sin dimensiones)
i = Categoría o tipo de residuo (alimentos, desechos de jardines o parques, papel y cartón, madera, textiles, etc.) dispuesto en el relleno sanitario
T = Año o período del inventario

El modelo de primer orden descrito por el IPCC (2006) proporciona dos alternativas o enfoques para estimar las emisiones de CH₄. La primera alternativa se conoce como modelo por fases múltiples y se basa en la degradación separada (alimentos, desechos de jardines o parques, papel y cartón, madera, textiles, etc.) de los residuos sólidos en los sitios de disposición final. Mientras que en la segunda se supone que la descomposición de todos los tipos de residuos es totalmente dependiente de la de los demás.

Teniendo en cuenta lo anterior y el tipo de información disponible, se optó por aplicar la primera alternativa para estimar las emisiones de CH₄, para lo cual, una vez definida la cantidad inicial de materia orgánica degradable y el período de vida media por tipo de residuo (Ver Cuadro A1.42) se aplicaron las Ecuaciones A1.40 y A1.41.

Cuadro 1.42. Parámetros cinéticos por tipo de residuo sólido dispuesto en el relleno sanitario de Navarro.

Tipo de residuo	Período de vida media (años)	Índice de generación de CH ₄ (años ⁻¹)	Referencias
Cartón	10	0,07	IPCC (2006)
Caucho y cuero	10	0,07	
Comida	2	0,4	
Higiénicos	2	0,17	
Jardín	4	0,17	
Madera	20	0,035	
Papel	10	0,07	
Textiles	10	0,07	

Ecuación A1.40

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mremT} + \left(DDOC_{maT-1} * e^{-k_i} \right)$$

Donde:

$DDOC_{maT}$ = Cantidad de materia orgánica acumulada en el relleno sanitario al final del año T (Gg)

$DDOC_{mremT}$ = Cantidad de materia orgánica dispuesta durante el año T que se ha descompuesto al final del año T (Gg)

$DDOC_{maT-1}$ = Cantidad de materia orgánica acumulada en el relleno sanitario al final del año T-1 (Gg)

k_i = Índice de generación de CH_4 en los residuos dispuestos de tipo i en base húmeda ($año^{-1}$)

Ecuación A1.41

$$DDOCm_{DescompuestaT} = DDOC_{mdecT} + DDOC_{maT-1} (1 - e^{-k_i})$$

Donde:

$DDOCm_{DescompuestaT}$ = Cantidad de materia orgánica descompuesta en el relleno sanitario durante el año T (Gg)

$DDOC_{mdecT}$ = Cantidad de materia orgánica dispuesta durante el año T que se ha descompuesto al final del año T (Gg)

$DDOC_{maT-1}$ = Cantidad de materia orgánica acumulada en el relleno sanitario al final del año T-1 (Gg)

k_i = Índice de generación de CH_4 en los residuos dispuestos de tipo i en base húmeda ($año^{-1}$)

Luego de cuantificar la cantidad de materia orgánica descompuesta en el relleno sanitario de Navarro en el período 2003–2008 se estimaron las emisiones de CH_4 con base en la Ecuación A1.42 y A1.43. Las cuales consideran que las cantidades de CH_4 generadas a partir de cada categoría o tipo de residuo deben sumarse, y las cantidades de CH_4 recuperado y oxidado en el material de la cubierta restarse (cuando sea aplicable), para obtener una estimación del total de las emisiones de CH_4 .

Ecuación A1.42

$$CH_{4GeneradoT} = DDOCm_{DescompuestaT} * F * \frac{16}{12}$$

Donde:

$CH_{4GeneradoT}$ = Cantidad de metano generado a partir de la materia orgánica descompuesta en el año T (Gg)

$DDOCm_{DescompuestaT}$ = Cantidad de materia orgánica descompuesta en el relleno sanitario durante el año T (Gg)

F = Fracción volumétrica de metano en el biogás generado (valor por defecto 0,5)

16/12 = Cociente de peso molecular entre el metano y carbono

Ecuación A1.43

$$CH_{4emitidoT} = \left(\sum_i CH_{4generado_{i,T}} \right)$$

Donde:

$CH_{4emitidoT}$ = Metano emitido durante el año T (Gg)

i = Categoría o tipo de residuo (alimentos, desechos de jardines o parques, papel y cartón, madera, textiles, etc.)
dispuesto en el relleno sanitario

A partir de los resultados generados por la Ecuación A1.43 para cada una de las categorías de residuos dispuestos, se construyeron las Figuras A1.12 a A1.19 para identificar no solo la producción de CH_4 que hubo en 2008, sino también para proyectar las emisiones “fugitivas” del relleno sanitario en el 2010 debido a la descomposición del material orgánico.

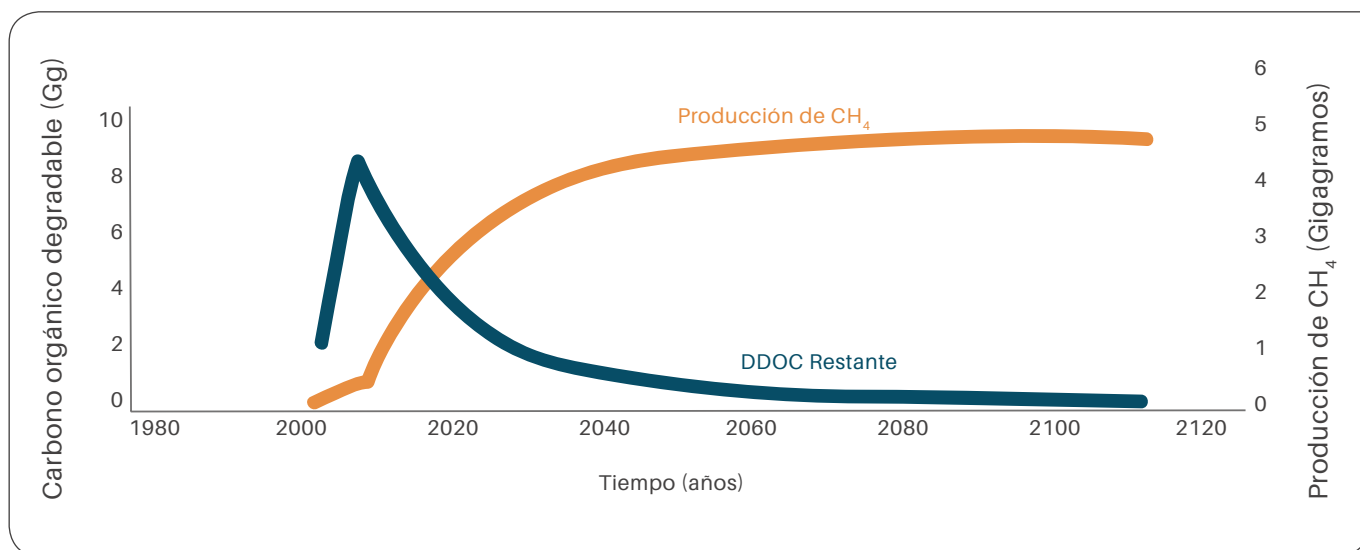


Figura A1.12. Descomposición del cartón y producción de CH₄ en el relleno sanitario de Navarro.

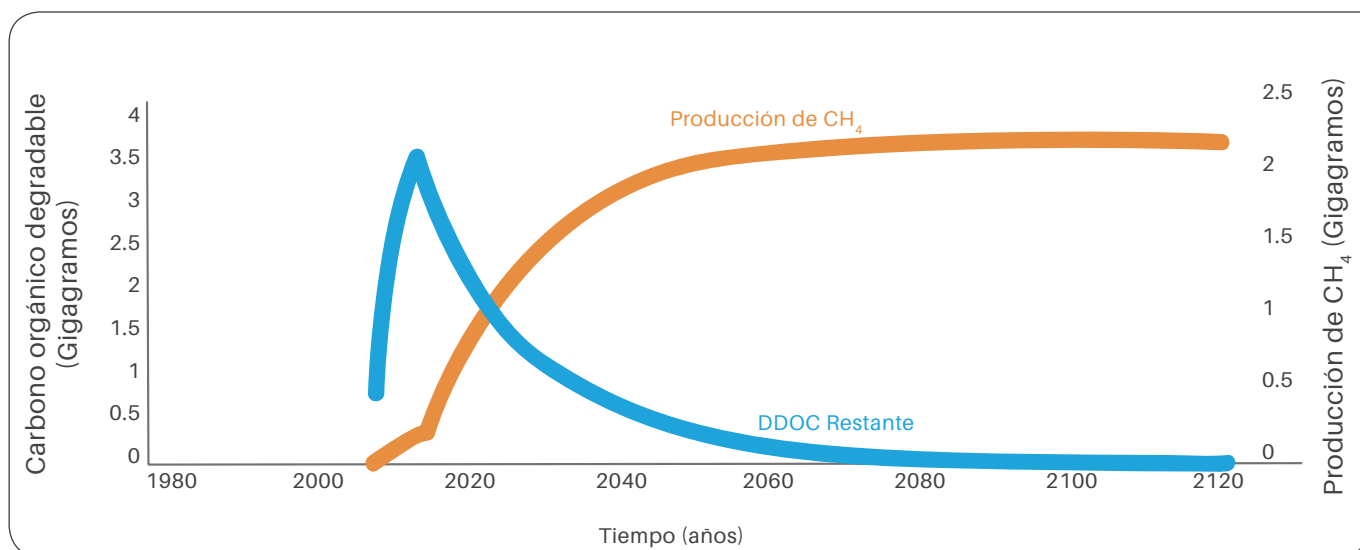


Figura A1.13. Descomposición del caucho y cuero y producción de CH₄ en el relleno sanitario de Navarro.

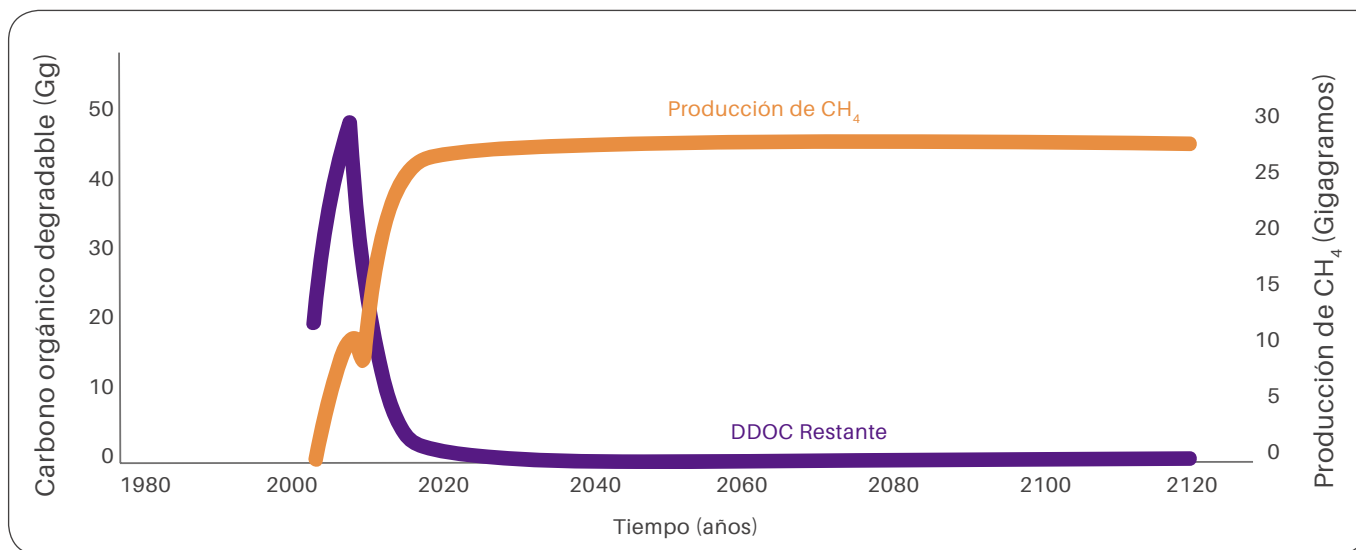


Figura A1.14. Descomposición residuos de comida y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

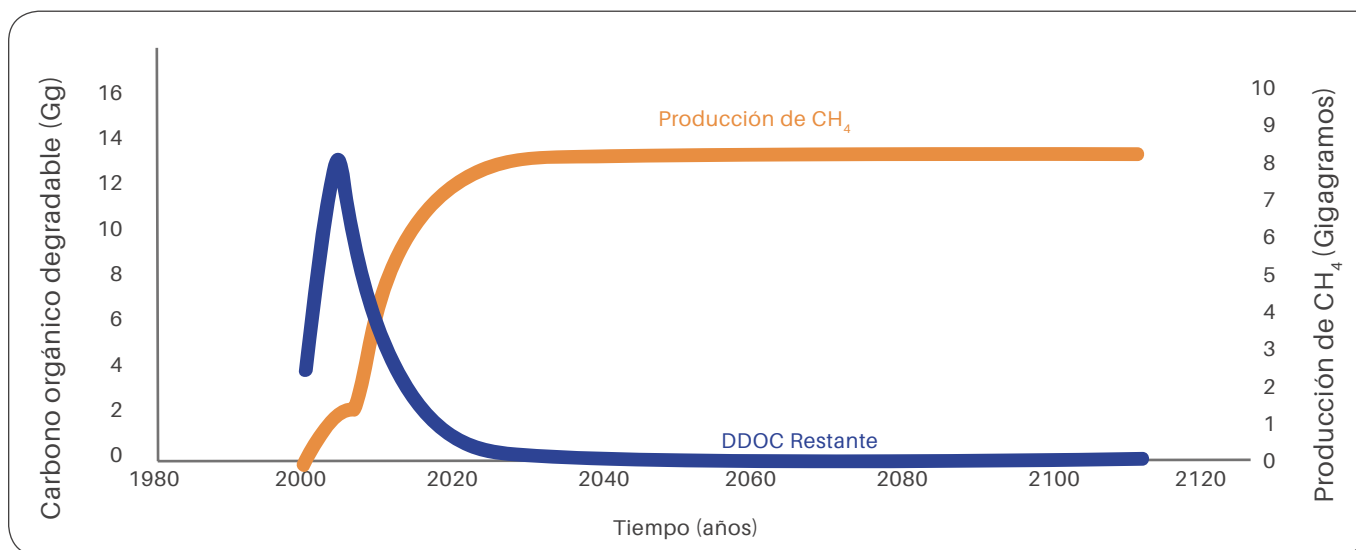


Figura A1.15. Descomposición de higiénicos y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

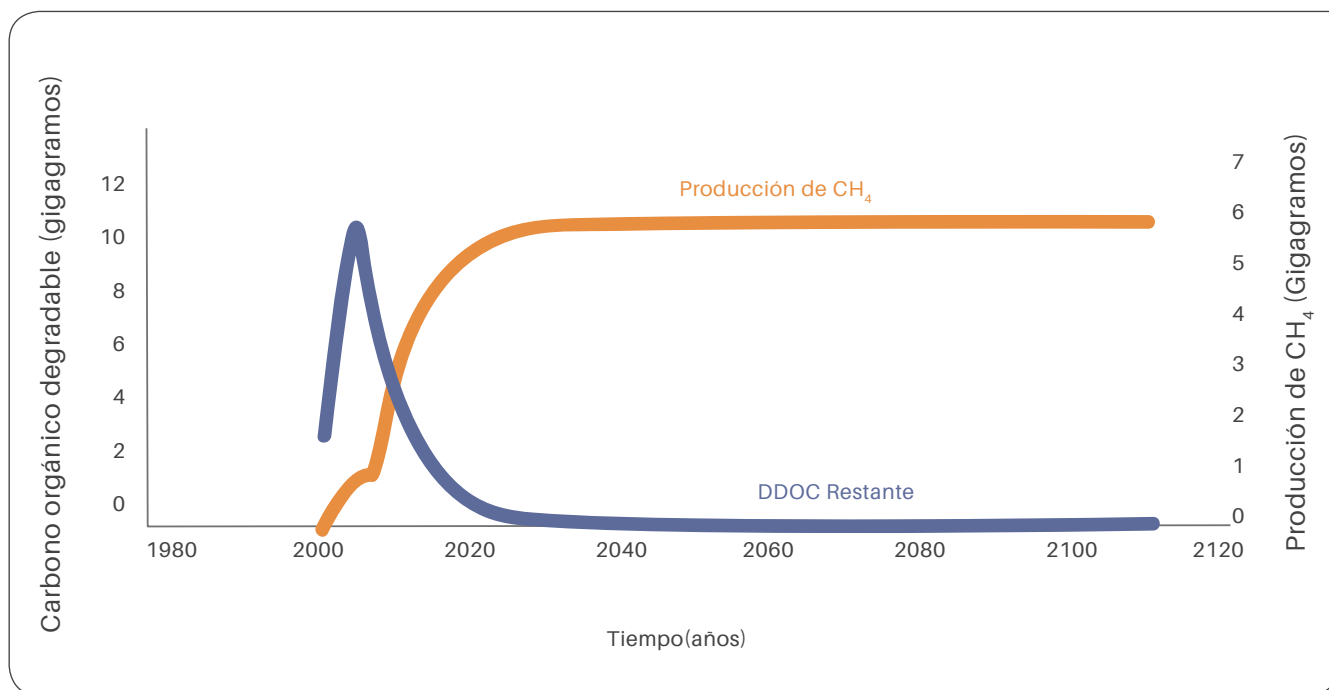


Figura A1.16. Descomposición de residuos de jardín y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

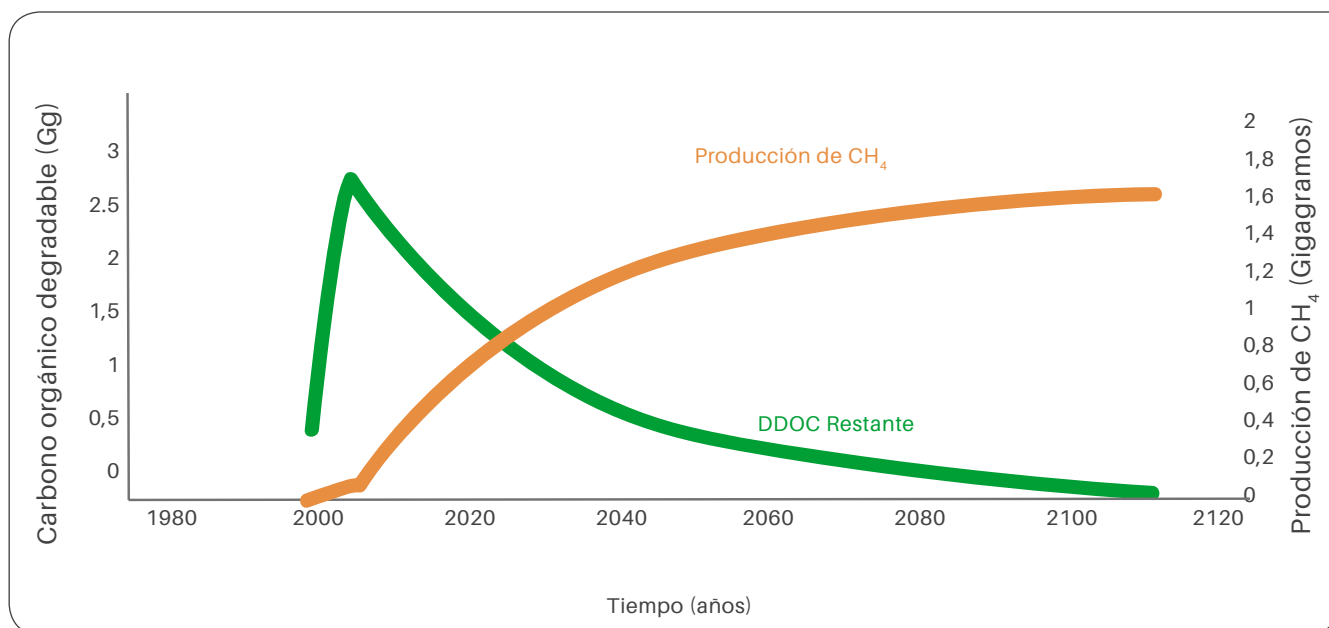


Figura A1.17. Descomposición de la madera y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

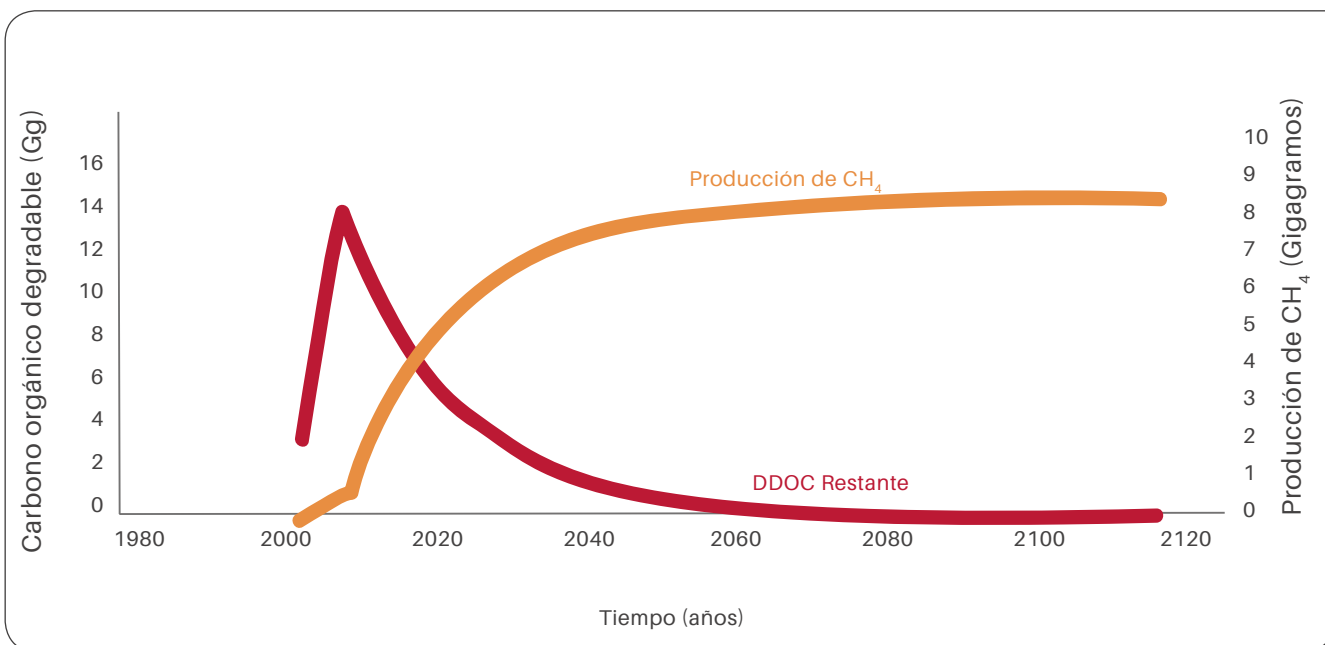


Figura A1.18. Descomposición de la madera y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

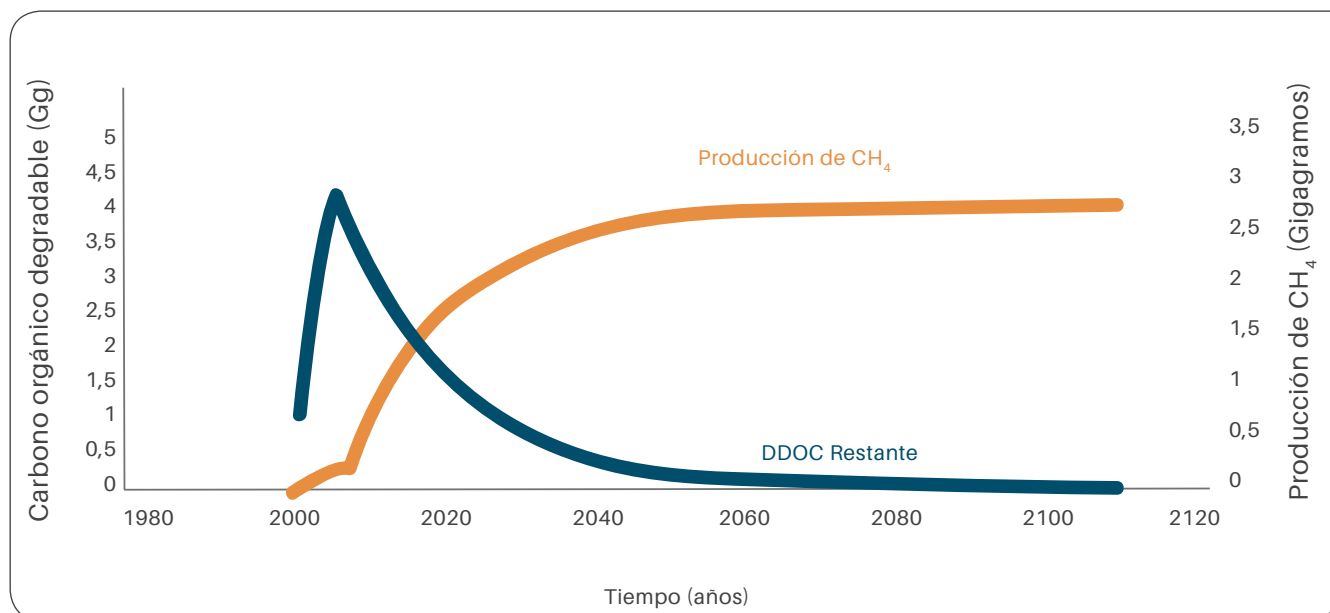


Figura A1.19. Descomposición del caucho y cuero y producción de CH_4 en el relleno sanitario de Navarro.

Con base en la información dispuesta en cada una de las figuras anteriores se sumaron las emisiones de CH₄ por cada categoría de residuo dispuesto en el relleno

sanitario con el fin de dar cuenta de las emisiones generadas en el 2008 y 2010, tal como se presenta en el Cuadro A1.43

Cuadro A1.43. Producción de CH₄ por categoría de residuos sólidos dispuesto en el relleno sanitario de Navarro.

Año	Emisiones de CH ₄ (Gg)							
	Cartón	Caucho	Comida	Higiénicos	Jardín	Madera	Papel	Textiles
2008	0,365	0,153	10,415	1,445	1,019	0,058	0,586	0,191
2010	0,732	0,308	14,726	2,583	1,821	0,122	1,176	0,383

Anexo B. Metodología empleada en el cálculo de emisiones de contaminantes criterio

Industrias manufactureras y de la construcción

Para cuantificar las emisiones de contaminantes criterios generadas por la categoría de industrias manufactureras y de la construcción en el municipio de Cali durante el año 2010 se empleó la metodología propuesta por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, por sus siglas en inglés) (2009), la cual indica que para una metodología de cálculo de Nivel se requiere el siguiente

tipo de información: i) consumo de combustible por tipo de industria, y ii) factores de emisión por defecto para cada tipo de gas a evaluar.

En este sentido, se retomó la información empleada para cuantificar las emisiones de GEI en la categoría de industrias manufactureras y de la construcción del sector energía y se complementó con la información suministrada por las guías EMEP (EEA, 2009) en cuanto a la selección de factores de emisión para contaminantes criterio, tal como se presenta en los Cuadros A2.1 y A2.2.

Cuadro A2.1. Consumo de combustible en Industrias manufactureras y de la construcción.

Tipo de industria	Consumo de combustible (TJ)				
	ACPM	Carbón	Gas natural	Gas propano	Madera
Agricultura/silvicultura/pesca/piscifactorías	0,09	-	1,53	-	-
Comercial/Institucional	12,53	-	240,62	9,52*10 ⁻³	-
Hierro y acero	5,53	4,54	20,00	1,64	230,85
Industria no especificada	1,71	0,25	257,66	2,92	-
Maquinaria	7,58*10 ⁻⁴	-	22,60	-	-
Metales no ferrosos	5,29	-	4,73	0,045	-
Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	26,30	3,65	1.290,22	0,64	118,42
Productos químicos	37,01	-	1.336,54	32,29	-
Pulpa, papel e imprenta	39,74	-	462,79	0,44	-
Textiles y cuero	3,58*10 ⁻²	293,60	310,47	-	-
Minerales no metálicos	-	0,26	0,96	-	-
Equipos de transporte	-	-	230,34	0,93	-
Madera y productos de madera	-	-	1,64	-	2,12
Otros sectores	-	-	2,39*10 ⁻³	-	-
Refinación de petróleo	-	-	0,18	-	-

Fuente: Elaboración propia con base en datos del DAGMA (2012).

Cuadro A2.2. Factores de emisión para contaminantes criterio según el tipo de combustible.

Combustible	Factores de emisión para contaminantes criterio (Kg.TJ ⁻¹)						
	NO _x	CO	COVDM	SO _x	TSP	PM ₁₀	PM _{2,5}
ACPM	100	40	10	140	27,5	21,5	16,5
Carbón	173	931	88,8	900	124	117	108
Gas natural y propano	70	25	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Madera	150	1.596	146,4	38,4	156,4	149,9	149,1

Fuente: EEA (2009).

Teniendo en cuenta la información de los Cuadros A2.1 y A2.2 se aplicó la Ecuación A2.1 con el objetivo de calcular las emisiones de Monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Compuestos Orgánicos diferentes del Metano (COVDM), entre otros.

Ecuación A2.1

$$Emisiones_{a,b,c} = Consumo_a * FE_{a,b,c}$$

Donde:

Emisiones_{a,b,c} = Emisiones según el tipo de industria, combustible y contaminante criterio (kg)

Consumo_{a,b} = Consumo de combustible según el tipo de industria (TJ)

FE_{b,c} = Factor de emisión para contaminantes criterio según el tipo de combustible (kg.TJ⁻¹)

a= Representa el tipo de industria

b= Representa el tipo de combustible

c= Representa el tipo de contaminante

- Emisiones de contaminantes criterio en el transporte terrestre: En el sector de transporte las fuentes móviles producen emisiones de gases directos de efecto invernadero tales como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) procedentes de la quema de diversos tipos de combustible. Pero

también generan otros contaminantes como el monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), dióxido de azufre (SO₂), material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) que causan o contribuyen a la contaminación del aire local o regional.

De acuerdo con Davies et al. (2006) las emisiones de GEI y contaminantes criterio procedentes de la combustión móvil se pueden estimar por medio de la actividad principal de transporte, entre las cuales se distinguen las de tipo terrestre, todo terreno, aéreo, ferrocarril y navegación marítima y fluvial.

La categoría de fuentes móviles o transporte terrestre incluye todos los tipos de vehículos para servicio ligero, como automóviles y camiones para servicio ligero, y los vehículos para servicio pesado, como los tractores de remolque y los autobuses, y las motocicletas de ciudad (incluidos los ciclomotores, *scooters* y triciclos). Por tal motivo, en el Cuadro A2.3 se muestra una descripción de las fuentes móviles tenidas en cuenta en el municipio de Cali con el fin de determinar las emisiones de contaminantes criterio siguiendo la metodología planteada por la EEA (2009).

Cuadro A2.3. División detallada correspondiente a la categoría de transporte terrestre.

Tipo de vehículo	Explicación
Automóviles	Emisiones de automóviles designados como tales en el país, que los registra principalmente para el transporte de personas y habitualmente con una capacidad de 12 personas o menos.
Camiones para servicio pesado y autobuses	Emisiones de todos los vehículos designados como tales en el país en que están registrados. Habitualmente, el peso bruto del vehículo oscila entre 3.500 y los 3.900 kg o más para camiones pesados y los autobuses están calificados para transportar a más de 12 personas.
Motocicletas	Emisiones de todo vehículo motorizado diseñado para viajar con no más de tres ruedas en contacto con el pavimento y que pese menos de 680 kg.

Fuente: IPCC (2006) y EEA (2009).

Con base en la información mostrada en el Cuadro A2.3 y el historial de vehículos matriculados en el municipio de Cali en el año 2010 se realizaron las homologaciones respectivas para cada una de las subcategorías del sector transporte terrestre, tal como se explica detalladamente en la Figura 10 referente a las emisiones de GEI en la

categoría transporte. De esta manera, se lista en el Cuadro A2.4 la información necesaria para cuantificar las emisiones de contaminantes criterio generadas por automóviles, camiones para servicio pesado y autobuses, y motocicletas.

Cuadro A2.4. Consumo de combustibles en vehículos de transporte.

Tipo de vehículo	Consumo de gasolina (Gal)
Automóviles	172.726.476,00
Camiones para servicio pesado y autobuses	109.128.483,00
Motocicletas	8.311.920,00

Fuente: Datos estimados por el CIAT en este análisis.

Para emplear la información del Cuadro A2.4 inicialmente fue necesario hacer la conversión de Galones a Kilogramos de Gasolina para emplear los factores de emisión adecuadamente, debido a que las unidades en las que se expresan en las guías EMEP (EEA, 2009) así lo indicaban. En este sentido se empleo la Ecuación A2.2 y se obtuvo la información que se presenta en el Cuadro A2.5 para posteriormente estimar las emisiones contaminantes criterio en esta categoría.

Ecuación A2.2

$$Consumo(Kg) = Consumo(Gal) * F_{Conversion} * \rho_{Gasolina} * 1000$$

Donde:

Consumo (kg)= Consumo de gasolina por tipo de vehículo (hg)

Consumo (Gal)= Consumo de gasolina por tipo de vehículo (Gal)

$F_{Conversion}$ = Factor de conversión de Galones a Metros cúbicos de gasolina ($37,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{Gal}^{-1}$)

$\rho_{Gasolina}$ = Densidad de la gasolina ($0,75 \text{ ton} \cdot \text{m}^{-3}$)

1000 = Factor de conversión de ton a kg de gasolina ($\text{kg} \cdot \text{ton}^{-1}$)

Finalmente con la información procesada y dispuesta en el Cuadro A2.5, se realizaron los cálculos de contaminantes criterio (NO_x , CO, COVDM, TSP y

NH_3) para automóviles, camiones de servicio pesado y autobuses, y motocicletas en el municipio de Cali.

Cuadro A2.5. Consumo de combustibles y factores de emisión en vehículos de transporte.

Tipo de vehículo	Consumo de Gasolina (Kg)	Factores de emisión para contaminantes criterio (g de gas. Kg combustible ⁻¹)				
		NO_x	CO	COVDM	TSP	NH_3
Automóviles	490.327.283,75	4,48	49,00	5,55	0,02	0,33
Camiones para servicio pesado y autobuses	309.788.481,12	3,24	68,70	3,91	0,02	0,32
Motocicletas	23.595.462,90	1,99	331,20	30,00	0,55	0,05

Ecuación A2.3

$$Emisiones_{a,b} = \frac{\text{Consumo (Kg)} * FE_{a,b}}{1000}$$

Donde:

$Emisiones_{a,b}$ = Emisiones por tipo de vehículo y contaminante criterio (kg)

Consumo (Kg) = Consumo de gasolina por tipo de vehículo (kg)

$FE_{a,b}$ = Factor de emisión por tipo de vehículo y contaminante criterio (g de gas. kg combustible)

1000 = Factor de conversión de gramos a kilogramos de contaminante criterio

a = Representa el tipo de vehículo (automóviles, camiones y motocicletas)

b = Representa el tipo de contaminante criterio (NO_x , CO, COVDM, etc.)

El cálculo para la estimación de las emisiones se realizó bajo un nivel metodológico I, descrito con la siguiente ecuación general.

Ecuación A2.4

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{NMCV}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión de COVDM (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de pintura aplicada)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de pintura aplicada)

De igual forma se presentan los factores de emisión en el Cuadro A2.6, dados para este nivel por la metodología EMEP (EEA, 2009), discriminados por la aplicación general de los tipos de pinturas.

Módulo uso de productos

Aplicación de pinturas

Para estimar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano correspondientes a esta categoría se consideraron los productos descritos en el Cuadro A2.6, cuya información fue tomada de la encuesta anual manufacturera para el área metropolitana de Cali-Yumbo del año 2007. Cabe resaltar que se tomó esta información porque no se encontraron datos más actualizados y específicos de esta actividad.

Cuadro A2.6. Información para estimar las emisiones de COVDM por aplicación de pinturas.

Aplicación industrial	Cantidad consumida (Kg)	Factor de emisión COVDM (g/kg pintura aplicada)
Pinturas de alta temperatura	105.107	400
Pinturas de protección industrial (vinílicas, epoxicas, poliéstericas)	136.308	
Pinturas para señales de tránsito	2.809	
Pinturas en polvo	234.132	
Pinturas en aerosol	0,214	
Aplicación para decoración		150
Pinturas para agua, p.v.a. y similares (emulsiones)	0,130	
Pinturas sintéticas (oleo - resinosas)	15.670	

Desengrasantes y lavado en seco

En la categoría de desengrasantes se contemplaron los principales solventes usados para la limpieza de grasas, aceites y otras películas orgánicas de diferentes superficies. Dentro de estos productos se encuentran el varsol, hexano, tetracloroetileno, mezclas básicas para aditivos, desengrasantes y similares.

La metodología de estimación de los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano se basó en la ecuación general descrita a continuación, que opera la cantidad de productos para la limpieza incluidos los solventes orgánicos y el factor de emisión específico dado por la metodología de Nivel I.

Ecuación A2.5

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de producto para la limpieza)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de producto para la limpieza)

Los datos de la actividad y el factor de emisión se presentan en el Cuadro A2.7.

Cuadro A2.7. Información para estimar las emisiones de COVDM por uso de desengrasantes.

Desengrasantes	Cantidad Consumida (Kg)	COVDM (g/kg producto para la limpieza)
Acetatos de etilo, butilo, amilo, propilo y similares	604.441	460
Alcohol butílico - butanol	680.698	
Alcohol isobutílico (isobutanol)	1.238.381	
Alcohol metílico metanol	451.960	
Alcohol propílico y alcohol isopropílico	6.648.757	
Aldehídos n.c.p.	11.125	
Antiincrustantes, antiespumantes, desengrasantes para calderas	185	
Ciclohexano (derivado del petróleo)	30	
Disolventes alifáticos N. 1, 2 y 3 derivados del petróleo	487	

(Continúa)

(Continuación)

Disolventes n.c.p. derivados del petróleo	841	460
Hexano	0,13	
Mezclas básicas para aditivos, desengrasantes y similares	40.742	
Tetracloroetileno (percloroetileno)	2.222	
Trietanolamina	68.765	
Varsol disolvente # 4	676	
Varsol f.d.r.	113	

Fuente: DANE (2007).

Para los cálculos de las emisiones en los establecimientos de lavado en seco se tuvo en cuenta la información referida por el DAGMA (2012) en cuanto a los sistemas y la proporción de uso de los mismos en este tipo de locales; estableciendo que el 75% de estos corresponden a sistemas de circuito cerrado y el 25% restante a circuito abierto.

La cantidad de textil tratado en el municipio de Santiago de Cali fue el resultado de operar el número de habitantes para el año 2010 por un factor per cápita de textil tratado dado por defecto en la guía EMEP (EEA, 2009). La ecuación que lo describe se presenta a continuación:

Ecuación A2.6

Textil tratado = Población * factor per cápita de tratamiento de textil

Donde:

Textil tratado= Textil tratado en lavado en seco (kg)

Población= Número de habitantes en el 2010

factor per cápita de tratamiento de textil: 0,3 kg/habitante*año

En este sentido, se aplicó una metodología de Nivel I para la cantidad porcentual de textil tratado bajo el sistema de circuito cerrado (75%), incorporando además un factor de emisión disminuido debido al sistema empleado; descrito en la siguiente ecuación:

Ecuación A2.7

$$E_{COVDM} = AR_{production} * ((1 - n_{abatement}) * EF_{tecnology unabated})$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante específico

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de textil tratado)

$n_{abatement}$ = Eficiencias de reducción del sistema

$EF_{tecnology unabated}$ = Factor de emisión del contaminante (kg de textil tratado)

Por otra parte para el textil tratado bajo el sistema abierto (25%) se empleó el factor de emisión dado en el Nivel II, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación A2.8

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

$E_{pollutant}$ = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de producto para la limpieza)

$E_{EFCOVDM}$ = Factor de emisión (g/kg de producto para la limpieza)

Los datos de la actividad y los factores de emisión para cada nivel se presentan en el Cuadro A2.8.

Cuadro A2.8. Información para estimar las emisiones de COVDM por textil tratado en lavado en seco.

Variable	Unidades	Cantidad
Población	Personas	2.244.536,0
Factor per cápita de tratamiento de textil	kg*hab ⁻¹ *año ⁻¹	0,3
Tipo de sistema utilizado en Santiago de Cali		
Circuito cerrado	%	75
Circuito abierto		25
Factor de emisión	g COVDM/kg textil tratado	40
		117
Eficiencia de reducción de acuerdo al sistema		
Circuito cerrado convencional por máquina	%	89

Procesamiento de caucho (Productos químicos)

El municipio de Santiago de Cali presenta industrias manufactureras catalogadas bajo el código CIIU 2219 “Fabricación de formas básicas de caucho y otros productos de caucho”; razón por la cual se cuantifican las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano.

La información incluida en esta categoría fue tomada de la encuesta anual manufacturera del año 2007, estadística de productos para el área metropolitana Cali-Yumbo, donde se incluyen productos como planchas laminadas de caucho, caucho espumado, entre otros artículos.

De acuerdo a lo anterior, se emplea una metodología de Nivel II mediante la Ecuación A2.9. Los datos de la actividad requeridos y el factor de emisión se presentan en el Cuadro A2.9.

Ecuación A2.9

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

$E_{pollutant}$ = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de caucho producido)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de caucho producido)

Cuadro A2.9. Información para estimar las emisiones de COVDM por procesamiento de caucho.

Caucho	Cantidad producida (kg)	Factor de emisión COVDM (g/kg producido)
Tejidos angostos, elásticos de fibras con hilos de caucho	27,74	8
Planchas láminas- de caucho	3,52	
Mezclas de caucho	16,45	
Caucho espumado	350,57	
Tapas y tapones de caucho	344,00	
Borradores de caucho	23,75	
Artículos de caucho	730,73	
Arandelas y otros empaques de caucho	29,10	
Rodillo de caucho	747,51	
Repuestos de caucho para automotores y maquinaria	117,64	
Polvo de caucho	1.031,96	
Retal de caucho	831,37	

Manufactura de productos farmacéuticos

En la industria manufacturera de farmacéuticos se presenta un elevado consumo de solventes orgánicos,

tales como xileno, metanol, tolueno, metil etil cetona, acetona, entre otros (Ver Cuadro A2.10), quienes posteriormente a su proceso de transformación generaran emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

Cuadro A2.10. Uso de solventes más comunes en diferentes industrias.

	Industria	Pinturas y similares	Limpieza de metales	Pesticidas	Farmacéutica	Lava secos	Imprentas
Solventes	Xileno						
	Metanol						
	Tolueno						
	Tetracloroetileno						
	Cloruro de Metileno						
	Metil Etil Cetona						
	Tricloroetileno						
	1,1,1-Tricloroetano						
	Acetona						
	Metil Isobutil Cetona						

Fuente: DAGMA (2012).

En este sentido se realizó una revisión acerca de las empresas con tal razón social y se procedió a estimar las emisiones. Encontrando que en Santiago de Cali existen 10 empresas catalogadas con el código CIIU 2100 dedicadas a la fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas medicinales y productos botánicos

de uso farmacéutico. Además de lo anterior, se tiene en cuenta el consumo de los principales solventes usados en la industria farmacéutica, cuyo dato es tomado a partir de la encuesta anual manufacturera estadística de materias primas para el área metropolitana Cali-Yumbo del año 2007.

Por lo anterior, se estiman las emisiones bajo la metodología de Nivel II mencionada en la Ecuación 14, usando los datos consolidados en el Cuadro A2.11

Ecuación A2.10

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de solvente usado)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de solvente usado)

Cuadro A2.11. Información para estimar las emisiones de COVDM por manufactura de productos farmacéuticos.

Solvente	Unidad	Cantidad Consumida (Kg)	Factor de emisión COVDM (g/kg Solvente usado)
Acetona	kg	14.563	300
Alcohol metílico metanol	kg	451.960	300
Toluenos	kg	438	300
Xilenos	kg	11	300
Metil etil cetona	kg	25.357	300

Manufactura de cinta adhesiva

En esta categoría se cuantificaron las emisiones de COVDM por el nivel de producción anual bajo una metodología Nivel II. Dado que la información de producción de cinta en los datos de la encuesta anual manufacturera estadística de productos para el área metropolitana Cali-Yumbo del año 2007, está expresada en kg se realizó una conversión a m² usando la Ecuación A2.11 y A2.12 y los datos del Cuadro A2.12.

Ecuación A2.11

$$Volumen\ cinta\ (cm^3) = \frac{masa\ de\ cinta\ producida\ (Kg)}{densidad\ (kg/cm^3)}$$

Ecuación A2.12

$$Área\ (cm^2) = volumen\ de\ cinta\ (cm^3) / Espesor\ (cm)$$

Cuadro A2.12. Información para estimar las emisiones de COVDM por manufactura de cinta adhesiva.

Cinta	Unidad	Cantidad producida
Cinta autoadhesiva	kg	1.901.673
Cinta de papel engomado		29,8
Cintas aislantes		31.905
Cintas pegantes transparente		704
Volumen de la cinta adhesiva	cm ³	2,28
Densidad	Kg/cm ³	0,00096
Espesor	cm	0,006
Factor de emisión de COVDM	g/m ² cinta	3

Fuente: Dow Corning (2005).

Una vez conocido el área de cinta adhesiva producida en el año 2007 se procedió a estimar las emisiones bajo la siguiente ecuación:

Ecuación A2.13

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (m² de cinta adhesiva producida)

EF_{COVDM} = Factor de emisión [g/(m² de cinta adhesiva producida)].

Manufactura de zapatos

Esta categoría contempla la producción de calzado anual. La información empleada fue tomada de la

encuesta anual manufacturera estadística de productos del año 2007 para el área metropolitana Cali-Yumbo.

Se empleó una metodología de Nivel II, basado en la ecuación general. Los datos de la actividad se presentan en el Cuadro A2.13.

Ecuación A2.14

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (par de zapatos producidos)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/par de zapatos producidos)

Cuadro A2.13. Información para estimar las emisiones de COVDM por manufactura de calzado.

Calzado	Cantidad producida (par)	Factor de emisión COVDM (g/par zapatos)
Calzado de caucho impermeable para mujer	271	0,045
Calzado de material plástico para mujer	95	
Calzado de cuero para hombre	337	
Calzado de cuero para mujer	1.001	
Calzado de cuero para niño o niña	13	
Calzado de cuero para colegiales	32	
Calzado de textiles y caucho para hombre	114	
Calzado deportivo de cuero	270	

Curtido de cueros

El curtido de cueros en su proceso de manufactura genera pequeñas emisiones de amoníaco (NH₃), esto debido al uso de sales de amonio en el proceso de desencalado (Alzate y Tobón, 2004). Razón por la

cual se calcularon las emisiones generadas en esta categoría. El factor de emisión usado corresponde al Nivel II de estimación, este se presenta en detalle y los datos usados en el Cuadro A2.13. La Ecuación A2.15 describe la operación matemática empleada.

Cuadro A2.14. Información para estimar las emisiones de NH₃ por curtido de cueros.

Tipo de Cueros	Cantidad (Kg)	Factor de emisión NH ₃ (g/kg cuero crudo)
Cueros curtidos gruesos para suela	25.503	0,68
Cueros de ganado porcino	469	

Fuente: DANE (2007).

Ecuación A2.15

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de cuero crudos)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de cuero crudos)

Imprenta

El uso de tintas en la industria de la imprenta genera cantidades considerables de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, sin embargo su producción está condicionada a los procesos o tecnologías usados.

De acuerdo a la información presentada en la encuesta anual manufacturera estadística de materias

primas del año 2007 para el área metropolitana Cali-Yumbo (Ver Cuadro A2.15), se encontraron varias técnicas de impresión; razón por la cual el proceso de estimación llevo el siguiente orden:

- Definir las técnicas usadas en el proceso de impresión.
- Aplicar el factor de emisión específico para cada técnica con ayuda de la siguiente ecuación.

Ecuación A2.16

$$E_{COVDM} = AR_{production} * EF_{COVDM}$$

Donde:

E_{COVDM} = Emisión del contaminante (g)

$AR_{production}$ = Datos de la actividad (kg de tinta usada)

EF_{COVDM} = Factor de emisión (g/kg de tinta usada)

Cuadro A2.15. Información para estimar las emisiones de COVDM por uso de tintas.

Tipo de tinta	Cantidad tinta usada (Kg)	Factor de emisión COVDM (g/kg tinta usada)	Técnica usada
Tintas flexográficas base acetato	11.202	900	Flexografía
Tintas flexográficas base agua	130.290	900	
Tintas flexográficas base alcohol	1.112.240	900	
Tintas litográficas para hojalata	6.239	730	Heat set offset
Tintas litográficas para prensas planas	1.344.690	730	
Tintas Tampográficas	358	800	Huecograbado
Tintas tipográficas para imprenta	427.299	500	No especifica
Tintas tipográficas para rotativas de periódicos	976	730	Heat set offset
Tintas web offset para rotativas	98.988	730	

Módulo de Agricultura

Cría de animales y gestión de estiércol

Las emisiones de contaminantes criterio generadas por la cría de animales y gestión de estiércol fueron determinadas bajo una metodología de Nivel I para las siguientes categorías: ganado lechero (lechería especializada), ganado lechero (doble propósito), otro ganado bovino (ceba), porcinos menores de 6 meses y porcinos mayores a 6 meses y de Nivel II para aves ponedoras, pollos de engorde, aves de traspatio, caprinos, equinos, mulares y asnares.

Para cuantificar las emisiones de óxido de nitrógeno, amoníaco y material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$), la metodología de Nivel I contempla los siguientes pasos y utiliza la información consolidada en el Cuadro A2.16.

1. Definir las categorías de animales y el número de individuos promedio anual de cada una de ellas.
2. Definir el sistema de gestión del estiércol de cada categoría (sólido o líquido).
3. Determinar los factores de emisión dados por defecto para cada categoría de animal.
4. Calcular las emisiones de cada contaminante para cada una de las categorías de animal y al número promedio de individuos, mediante la siguiente ecuación.

Ecuación A2.17

$$E_{\text{pollutant animal}} = AAP_{\text{animal}} * EF_{\text{pollutant animal}}$$

Donde:

AA_{Panimal} = Número promedio de individuos de una categoría de animal

$EF_{\text{pollutant animal}}$ = Factor de emisión para cada contaminante

Cuadro A2.16. Información para estimar las emisiones de contaminantes criterio por cría de animales y gestión de estiércol bajo metodología Nivel I.

Categoría de ganado	Número de individuos AAP. año ⁻¹	Factor de emisión					
		Kg NH ₃ . AAP ⁻¹ año ⁻¹		Kg NO. AAP ⁻¹ año ⁻¹		Kg. AAP ⁻¹ . año ⁻¹	
		Líquido	Sólido	Líquido	Sólido	PM ₁₀	PM _{2,5}
Aves ponedoras	2.163.237	0,48		0,0001		0,017	0,002
Pollo de engorde	4.157.117	0,22		0,001		0,052	0,007
Aves de traspato	8.886	0,48			0,0002	0,084	0,016
Caprinos	200		1,4		0,005	0	0
Equinos	1.000		14,8		0,131	0,18	0,12
Mulares y asnares	40		14,8		0,131	0,18	0,12

Por otra parte, la metodología de Nivel II para estimar amoníaco, óxido nitroso, óxido de nitrógeno y nitrógeno molecular, establece una serie de pasos descritos a continuación:

1. Definir las categorías de animales a evaluar, el número de individuos, el peso o rango de edad.
2. Calcular la tasa de excreción anual de N por categoría de animal, esta fue calculada mediante la Ecuación A2.18 dada en las guías del IPCC (2006).

Ecuación A2.18

$$Nex_{(T)} = N_{\text{indice}(T)} * \frac{TAM}{1000} * 365$$

Donde:

$Nex_{(T)}$ = Excreción anual de nitrógeno para la categoría de animal (kg N. Animal-1.Año⁻¹)

$N_{\text{indice}(T)}$ = Tasa de excreción de nitrógeno por defecto (kg N. 1000 kg masa animal⁻¹. Día⁻¹)

TAM= Masa animal típica para la categoría de ganado T (kg animal⁻¹)

3. Calcular la proporción anual de N excretado que se deposita durante el pastoreo, en el corral y en patios. Esto se basa en la tasa de N anual excretado y las proporciones de deposición de excremento en cada uno de los lugares (Xbuild, Xyard, Xgraz). Estas proporciones a su vez dependen de la cantidad de tiempo que pasan los animales en el pastoreo, corral y en patios. Estos datos fueron tomado por defecto de las guías EMEP (EEA,2009).

Ecuación A2.19

$$m_{\text{grazN}} = AAP * Nex_{(T)} * (365 - \text{housed period}) / 365 * (1 - \text{excreta on yards})$$

Ecuación A2.20

$$m_{\text{yardN}} = AAP * Nex_{(T)} * \text{excreta on yards}$$

Ecuación A2.21

$$m_{\text{buildN}} = AAP * Nex_{(T)} * (\text{housed period} / 365) * (1 - \text{excreta on yards})$$

Donde:

AAP= Número promedio de individuos de una categoría de animal

$N_{ex(T)}$ = Tasa de excreción anual de N

housedperiod = Número de días que están los animales en el corral

excreta on yards= Fracción de excreta depositada en los patios

4. Calcular la cantidad de nitrógeno amoniacal (TAN) depositado durante el pastoreo, en patios y en el corral ($m_{graz_{TAN}}$, $m_{yard_{TAN}}$ y $m_{build_{TAN}}$).

Ecuación A2.22

$$m_{graz_{TAN}} = m_{grazN} * \%TAN \text{ excreted} / 100$$

Ecuación A2.23

$$m_{yard_{TAN}} = m_{yardN} * \%TAN \text{ excreted} / 100$$

Ecuación A2.24

$$m_{build_{TAN}} = m_{buildN} * \%TAN \text{ excreted} / 100$$

Donde:

%TAN excreted= Porcentaje de nitrógeno amoniacal excretado

5. Calcular las cantidades de nitrógeno amoniacal y nitrógeno total depositado en los corrales manejados como líquido ($m_{buildslurry_{TAN}}$) o como sólido ($m_{buildsolid_{TAN}}$). La proporción de estiércol manejado como sólido y líquido para los cerdos fue tomado de Quintana et al. (2004) y para los bovinos fue tomado de EEA (2009).

Ecuación A2.25

$$m_{build_slurry_TAN} = m_{build_{TAN}} * \% \text{ slurry system} / 100$$

Ecuación A2.26

$$m_{build_solid_{TAN}} = m_{build_{TAN}} * \% \text{ solid system} / 100$$

Ecuación A2.27

$$m_{build_slurry_N} = m_{buildN} * \% \text{ slurry system} / 100$$

Ecuación A2.28

$$m_{build_solid_N} = m_{buildN} * \% \text{ solid system} / 100$$

Donde:

% slurry system= Proporción de estiércol que es manejado como suspensión

% solid system= Proporción de estiércol que es manejado como sólido

6. Calcular las pérdidas de nitrógeno (NH_3 -N) como sólido y líquido, y las emisiones de amoníaco en esta categoría. Los factores de emisión son dados por defecto en la guía y se presentan en detalle en el Cuadro A2.17.

Ecuación A2.29

$$E_{build_slurry} = m_{build_slurry_TAN} * EF_{NH_3_House_Slurry}$$

Ecuación A2.30

$$E_{build_solid} = m_{build_solid_{TAN}} * EF_{NH_3_House_Solid}$$

Ecuación A2.31

$$E_{yard} = m_{yard_{TAN}} * EF_{NH_3_yard}$$

Donde:

EF_{NH_3} = Factor de emisión

7. Este paso solo se aplica para el estiércol que es manejado como sólido, busca identificar la cantidad de nitrógeno que es adicionado en las camas de los animales y la inmovilización del nitrógeno amoniacal en estas. Para esto se utilizan valores dados por defecto acerca de la cantidad de paja utilizadas al año por cada tipo de animal y las entradas de nitrógeno a estas (ver Cuadro A2.18).

Para el estiércol que se gestiona como sólido es necesario tener en cuenta la fracción de nitrógeno amoniacal (fimm) que está inmovilizado como materia orgánica, puesto que esta fracción reducirá considerablemente las emisiones de amoníaco durante el almacenamiento y uso del mismo. El valor de esta fracción es dado por defecto por EEA (2009) y corresponde a 0,0067 kg.kg⁻¹.

Ecuación A2.32

$$mass \text{ of bedding} = AAP * paja * \% \text{ solid system} / 100$$

Ecuación A2.33

$$m_{bedding} = AAP * N \text{ added} * \% \text{ solid system} / 100$$

Ecuación A2.34

$$m_{ex_build_solid_TAN} = m_{build_solid_TAN} - (E_{build_solid} + (mass\ of\ bedding * f_{imm}))$$

Ecuación A2.35

$$m_{ex_build_solid_N} = m_{build_solid_N} - (E_{build_solid} + m_{bedding})$$

Donde:

mass of bedding= Masa de las camas de los animales (kg)

paja= Cantidad de paja usada para las camas (kg/año)

$m_{bedding}$ = Cantidad de nitrógeno en las camas (kg N)

N added= Nitrógeno adicionado por la paja

(kg.animal⁻¹*año⁻¹)

$m_{exbuildsolid_AN}$ = Masa del nitrógeno amoniacal inmovilizado en el corral (kg)

$m_{exbuildsolid_TAN}$ = Masa del nitrógeno amoniacal inmovilizado en el corral (kg)

8. Calcular las cantidades de nitrógeno elemental y nitrógeno amoniacal almacenados antes de la aplicación a la tierra. Es importante conocer la proporción de sólidos y líquidos que se manejan en la mezcla almacenada (X_{store_slurry} y $X_{store\ FYM}$); estos valores se tomaron por defecto recomendados por la guía EMEP (EEA, 2009).

Para líquidos:

Ecuación A2.36

$$m_{storage_slurry_TAN} = \left((m_{build_slurry_TAN} + m_{yard_TAN}) - (E_{build_slurry} + E_{yard}) \right) * X_{store_slurry}$$

Ecuación A2.37

$$m_{storage_slurry_N} = \left((m_{build_slurry_N} - E_{build_slurry}) + (m_{yard_N} - E_{yard}) \right) * X_{store_slurry}$$

Ecuación A2.38

$$m_{spread_direct_slurry_TAN} = \left((m_{build_slurry_TAN} + m_{yard_TAN}) - (E_{build_slurry} + E_{yard}) \right) * (1 - X_{store_slurry})$$

Ecuación A2.39

$$m_{spread_Direct_slurry_N} = \left((m_{build_slurry_N} - E_{build_slurry}) + (m_{yard_N} - E_{yard}) \right) * (1 - X_{store_slurry})$$

Para sólidos:

Ecuación A2.40

$$m_{storage_solid_TAN} = m_{ex_build_solid_TAN} * X_{store_solid}$$

Ecuación A2.41

$$m_{storage_solid_N} = m_{ex_build_solid_N} * X_{store_solid}$$

Ecuación A2.42

$$m_{spread_{direct_solid_TAN}} = m_{ex_build_solid_TAN} * (1 - X_{store_{solid}})$$

Ecuación A2.43

$$m_{spread_{direct_solid_N}} = m_{ex_build_solid_N} * (1 - X_{store_{solid}})$$

Donde, dados en kg:

$m_{storage_slurry_TAN}$ = Masa del nitrógeno amoniacal almacenado en los líquidos

$m_{storage_slurry_N}$ = Masa del nitrógeno elemental almacenado en los líquidos

$m_{spread_direct_slurry_TAN}$ = Masa de nitrógeno amoniacal aplicado directamente en los líquidos

$m_{spread_direct_slurry_N}$ = Masa de nitrógeno elemental aplicado directamente en los líquidos

$m_{storage_{solid_TAN}}$ = Masa del nitrógeno amoniacal almacenado en los sólidos

$m_{storage_solid_N}$ = Masa del nitrógeno elemental almacenado en los sólidos

$m_{spread_direct_solid_TAN}$ = Masa de nitrógeno amoniacal aplicado directamente en los sólidos

$m_{spread_direct_solid_N}$ = Masa de nitrógeno elemental aplicado directamente en los sólidos

9. Calcular la cantidad de emisiones que se producirán por el nitrógeno amoniacal en los lodos generados por el almacenamiento del estiércol. Es necesario tener en cuenta la fracción de nitrógeno orgánico ($f_{min}=0,1$) que es mineralizado a nitrógeno amoniacal antes de calcular las emisiones gaseosas, de la siguiente manera.

Ecuación A2.44

$$mm_{storage_slurry_TAN} = m_{storage_{slurry_TAN}} + \left((m_{storage_{slurry_N}} - m_{storage_{slurry_TAN}}) * f_{min} \right)$$

10. Calcular las emisiones de NH_3 , N_2O , NO y N_2 , usando los respectivos factores de emisión y la masa de nitrógeno amoniacal.

Para líquidos:

Ecuación A2.45

$$E_{storage_slurry} = E_{storage_slurry_NH_3} + E_{storage_slurry_N_2O} + E_{storage_slurry_NO} + E_{storage_slurry_N_2}$$

Ecuación A2.46

$$E_{storage_slurry_NH_3} = mm_{storage_slurry_TAN} * EF_{NH_3 storage_slurry}$$

Ecuación A2.47

$$E_{storage_slurry_N_2O} = mm_{storage_slurry_TAN} * EF_{N_2O storage_slurry}$$

Ecuación A2.48

$$E_{storage_slurry_NO} = mm_{storage_slurry_TAN} * EF_{NO storage_slurry}$$

Ecuación A2.49

$$E_{storage_slurry_N_2} = mm_{storage_slurry_TAN} * EF_{N_2 storage_slurry}$$

11. Calcular el total de nitrógeno y nitrógeno amoniacal que es aplicado en el campo, recordando restar las emisiones de cada contaminante generadas en el almacenamiento.

Para líquido:

Ecuación A2.50

$$m_{applic_slurry_TAN} = \left(m_{spread_direct_slurry_TAN} + mm_{storage_slurry_TAN} \right) - \left(E_{storage_slurry_NH_3 + N_2O + NO + N_2} \right)$$

Ecuación A2.51

$$m_{applic_slurry_N} = \left(m_{spread_direct_slurry_N} + mm_{storage_slurry_N} \right) - \left(E_{storage_slurry_NH_3 + N_2O + NO + N_2} \right)$$

Ecuación A2.52

$$E_{storage_solid_leach} = m_{storage_solid_TAN} * EF_{storage_leaching_solid}$$

Para sólido:

Ecuación A2.53

$$m_{applic_solid_TAN} = \left(m_{storage_solid_TAN} + m_{spread_direct_solid_TAN} \right) - \left(E_{storage_solid_NH_3 + N_2O + NO + N_2} \right)$$

Ecuación A2.54

$$m_{applic_solid_N} = \left(m_{storage_solid_N} + m_{spread_direct_solid_N} \right) - \left(E_{storage_solid_NH_3 + N_2O + NO + N_2} \right)$$

12. Calcular las emisiones de amoníaco (NH₃-N) durante e inmediatamente después de la aplicación en campo, usando un factor de emisión (EF_{applic}) combinado con (m_{applicTAN}).

Ecuación A2.55

$$E_{applic_slurry} = m_{applic_slurry_TAN} * EF_{NH_3 \text{ application on slurry}}$$

Ecuación A2.56

$$E_{applic_solid} = m_{applic_solid_TAN} * EF_{NH_3 \text{ application on slurry}}$$

13. Calcular la cantidad neta de nitrógeno retornado a la tierra a partir de la aplicación de estiércol y las pérdidas por NH₃-N.

Para líquido:

Ecuación A2.57

$$m_{returned_slurry_TAN} = m_{applic_slurry_TAN} - E_{applic_slurry}$$

Ecuación A2.58

$$m_{returned_slurry_N} = m_{applic_slurry_N} - E_{applic_slurry}$$

Ecuación A2.59

$$m_{returned_solid_TAN} = m_{applic_solid_TAN} - E_{applic_solid}$$

Ecuación A2.60

$$m_{returned_solid_N} = m_{applic_solid_N} - E_{applic_solid}$$

14. Calcular las emisiones de NH_3 -N del pastoreo.

Ecuación A2.61

$$E_{graz} = m_{graz_TAN} * EF_{NH_3_grazing}$$

Además de ello, se debe hacer un balance del nitrógeno, las entradas (cantidad de las excreciones de los animales + cama de los animales) deben coincidir con las salidas (emisiones + deposiciones en la tierra).

Ecuación A2.62

$$TAN\ returned = m_{graz_TAN} - E_{graz}$$

Ecuación A2.63

$$N\ returned = m_{graz_N} - E_{graz}$$

Ecuación A2.64

$$N\ input = (m_{graz_N} + m_{yard_N} + m_{build_N}) + m_{bedding}$$

15. Sumar todas las emisiones provenientes de la gestión de estiércol y convertirlos a masa de acuerdo a cada contaminante.

Ecuación A2.65

$$E_{MMS_{NH_3}} = (E_{yard} + E_{build_{slurry}} + E_{build_{solid}} + E_{storage_{NH_3\ Slurry}} + E_{storage_{NH_3\ Solid}} + E_{applic_{slurry}} + E_{applic_{solid}}) * 17 / 14$$

Ecuación A2.66

$$E_{MMS_NO} = (E_{storage_{NO_{slurry}}} + E_{storage_{NO_{solid}}}) * 30 / 14$$

Donde $E_{MMS_{NH_3}}$ y E_{MMS_NO} son las emisiones de la gestión de estiércol de amoníaco y óxido de nitrógeno (kg), respectivamente.

Cuadro A2.17. Factores de emisión y cantidad de paja consumida al año por categoría de animal para el cálculo de las emisiones de contaminantes criterio bajo metodología Nivel II.

Factores de emisión	Categoría animal	Ganado lechero	Ganado doble propósito	Otro ganado bovino	Porcinos (> 6 meses)	Porcinos (< de 6 meses)
	Información adicional					
	Paja, kg/año	1.500	500	500	200	200
	N adicionado por el material de la cama, kg/animal/año	6	2	2	0,8	0,8
	EF NH ₃ corral, líquido	0,2	0,2	0,2	0,28	0,28
	EF NH ₃ corral, sólido	0,19	0,19	0,19	0,27	0,27
	EF NH ₃ patio	0,3	0,3	0,3	0	0
	EF NH ₃ almacenamiento, líquido	0,2	0,2	0,2	0,14	0,14
	EF NH ₃ almacenamiento, sólido	0,27	0,27	0,27	0,45	0,45
	EF N ₂ O almacenamiento, líquido	0,001	0,001	0,001	0	0
	EF N ₂ O almacenamiento, sólido	0,08	0,08	0,08	0,05	0,05
	EF NO almacenamiento, líquido	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	EF NO almacenamiento, sólido	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	EF N ₂ almacenamiento, líquido	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	EF N ₂ almacenamiento, sólido	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	EF lixiviación de almacenamiento, sólido	0	0	0	0	0
	EF NH ₃ aplicación, líquido	0,55	0,55	0,55	0,4	0,4
	EF NH ₃ aplicación, sólido	0,79	0,79	0,79	0,81	0,81
	EF NH ₃ pastoreo	0,1	0,1	0,1	0	0

La estimación de las emisiones de material particulado de tamaños 10 y 2,5 μm bajo la metodología de Nivel II, fue calculada bajo la siguiente ecuación y los datos consolidado en el Cuadro A2.18.

Ecuación A2.67

$$E_{PM_i} = AAP * X_{house} * \beta * (X_{slurry} * EF_{slurry} * + (1 - X_{solid i}) * EF_{solid i})$$

Donde:

E_{PM_i} = Emisiones de PM_{10} o $PM_{2,5}$ por categoría de animal (kg.año^{-1})

β = Factor de conversión de unidades de masa (1 kg.kg^{-1})

X_{house} = Fracción de tiempo que pasan los animales en el corral (días)

X_{slurry} = Fracción que es manejada como estiércol líquido

EF_{slurry} = Factor de emisión para el sistema de gestión de estiércol (líquido) ($\text{kg.APP}^{-1}.\text{año}^{-1}$)

EF_{solid} = Factor de emisión para el sistema de gestión de estiércol (sólido) ($\text{kg.APP}^{-1}.\text{año}^{-1}$)

Cuadro A2.18. Información para estimar las emisiones de material particulado por cría de animales y gestión de estiércol bajo metodología Nivel II.

Categoría	Número de individuos	Período en el corral	Fracción de estiércol que es manejada		Factor de emisión para PM_{10}		Factor de emisión para $PM_{2,5}$	
			Líquido	Sólido	Líquido	Sólido	Líquido	Sólido
Ganado lechero	882	180	0,5	0,5	0,7	0,36	0,45	0,23
Ganado doble propósito	120	180	0,5	0,5	0,32	0,24	0,21	0,16
Otro ganado bovino	601	180	0,5	0,5	0,32	0,24	0,21	0,16
Porcinos menores de 6 meses	8.562	365	0,9	0,1	0,42	0,5	0,07	0,08
Porcinos mayores de 6 meses	858	365	0,9	0,1	0,42	0,5	0,07	0,08

Quema de biomasa agrícola

De acuerdo a las categorías presentadas en la metodología de EMEP (EEA, 2009) y el tipo de biomasa que se quema en el municipio de Santiago de Cali, se seleccionó el nivel metodológico I que usa la siguiente ecuación:

Ecuación A2.68

$$E_{contaminante} = AR_{residue burnt} * EF_{pollutant}$$

Donde:

$E_{contaminante}$ = Emisión del contaminante (kg)

$AR_{residue burnt}$ = Masa de residuo quemado (kg materia seca)

$EF_{pollutant}$ = Factor de emisión por contaminante (kg.kg^{-1}) materia seca)

Para la estimación de la masa de residuos quemados ($AR_{residue burnt}$) se tuvo en cuenta la información descrita en el Cuadro 10, referente al cultivo de caña de azúcar y la siguiente ecuación:

$$AR_{\text{residue burnt}} = \rho_{\text{Biomasa}} * R_{rc} * m_{\text{seca}} * F_{\text{combustión}} * A * 1000$$

Donde:

$A_{\text{Residue burnt}}$ = Masa de residuos quemados (kg)

ρ_{Biomasa} = Densidad de biomasa del cultivo de caña (ton/ha)

R_{rc} = Relación residuo/cultivo (0,11)

m_{seca} = Porcentaje de materia seca en el cultivo de caña (30%)

$F_{\text{combustión}}$ = Factor de combustión (80%)

A = Superficie de caña quemada (ha)

Cuadro A2.19. Información para estimar las emisiones de contaminantes criterio por quema de cultivos de caña de azúcar en Santiago de Cali durante el año 2010.

Variable	Unidad	Valor	Referencia
Porcentaje de área quemada	%	30	Comunic. CENICAÑA (2015)
Superficie quemada	Ha	1.718	
Densidad de biomasa	Ton.ha ⁻¹	157	
Relación residuo/cultivo	Adimensional	0,11	IPCC (2006)
Fración de materia seca	%	30	
Factor de combustión	%	80	

Posteriormente, se establecieron los factores de emisión para cada contaminante propuestos por la metodología EMEP (EEA, 2009) para este nivel de estimación y se calcularon las emisiones correspondientes a cada uno de ellos.

Cuadro A2.20. Información para estimar las emisiones de contaminantes criterio por quema de cultivos de caña de azúcar en Santiago de Cali durante el año 2010.

Contaminante	Factor de emisión	Unidades
NO _x	0,0024	Kg.kg ⁻¹ materia seca
CO	0,0589	
COVDM	0,0063	
SO _x	0,0003	
NH ₃	0,0024	
TSP	0,0058	
PM ₁₀	0,0058	
PM _{2,5}	0,0055	
Total 4 PAHs	0,1081	g. Kg ⁻¹ materia seca
NO	0,0012	Kg. Kg ⁻¹ materia seca

(Continúa)

(Continuación)

Pb	0,865	mg. Kg ⁻¹ materia seca
Cd	0,049	
Hg	0,008	
As	0,058	
Cr	0,22	
Ni	0,177	
Se	0,036	
Zn	0,028	

Producción de cultivos y suelos agrícolas

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), amoníaco (NH₃), material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y óxido de nitrógeno (NO) generadas por esta categoría fueron calculadas mediante una metodología de Nivel I, que involucra la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado por cultivo al año y el número de hectáreas de cada tipo de cultivo.

La ecuación general para estimar los COVDM, el amoníaco y el óxido de nitrógeno se describe a continuación:

Ecuación A2.70

$$Epollutant = AR_{fertiliser\ applied} * EF_{pollutant}$$

Donde:

Epollutant = Cantidad de contaminante emitido (kg/año)

AR_{fertiliser applied} = cantidad de N aplicado (kg/año)

EF_{pollutant} = Factor de emisión del contaminante (kg/kg)

Por otra parte, la ecuación que describe el método de estimación del material particulado de tamaños 10 y 2,5 µm es la siguiente:

Ecuación A2.71

$$Epollutant = AR_{area} * EF_{pollutant}$$

Donde:

Epollutant = Cantidad de contaminante emitido (kg/año)

A_{area} = Área cubierta por cultivos (ha)

EF_{pollutant} = Factor de emisión del contaminante (kg/ha.año)

El número de hectáreas, la cantidad de fertilizantes nitrogenados usados y la cantidad de nitrógeno aplicado por cada tipo de cultivo se presentan en el Cuadro A2.21. Este último fue resultado de operar la cantidad de fertilizante aplicado por el porcentaje del contenido de nitrógeno en el fertilizante.

Cuadro A1.21. Información requerida para estimar las emisiones de contaminantes criterio por cantidad de fertilizante nitrogenado y suelos agrícolas para Santiago de Cali.

Tipo de cultivo	Superficie sembrada (ha)	Cantidad de fertilizante nitrogenado (Bulto.ha ⁻¹)	Cantidad de fertilizante nitrogenado (Kg)	Porcentaje de N en el fertilizante (%)	Cantidad de N aplicado (Kg N)
Frijol de ladera	15	5	3.750	15	563
Maíz ladera	110	2	11.000	24	2.640
		7	38.500	46	17.710

(Continúa)

(Continuación)

Café	609,5	6	182.850	46	84.111
		2	60.950	24	14.628
Caña panelera	5.726	2,1	601.230	46	276.566
Plátano	42	6	12.600	46	5.796
		7	14.700	15	2.205
Frijol plana	5	5	1.250	46	575
		5	1.250	15	188
Arveja	10	3	1.500	46	690
		4	2.000	15	300
Cilantro	15	4	3.000	46	1.380
		6	4.500	15	675
Lechuga	12	2	1.200	24	288
		7	4.200	15	630
Pimentón	5	2	500	46	230
		3	750	15	113
Tomate	34	9	15.300	15	2.295
Repollo	12	2	1.200	24	288
		7	4.200	15	630
Zapallo	20	2	2.000	15	300
Aguacate	15	3,6	2.700	46	1.242
		7,2	5.400	15	810
Banano	20	2	2.000	46	920
		4	4.000	15	600
Cítricos	40	7,5	15.000	46	6.900
		3	6.000	24	1.440
		15	30.000	15	4.500
Guayaba	15	1,0	750	46	345
		4	3.000	15	450
Lulo	12	1,4	840	24	202
		5,6	3.360	15	504
Mora	8	3	1.200	24	288
		40	16.000	15	2.400
Tomate de árbol	12	5	3.000	46	1.380
		8,4	5.040	15	756
		2	1.200	24	288

Incendios forestales

Las emisiones de esta categoría fueron estimadas bajo una metodología de Nivel II, donde se calcularon contaminantes criterio y otros gases traza relacionados a la incineración de la biomasa. El cálculo relaciona datos específicos para Colombia como la cantidad de biomasa aérea presente en los bosques tropicales (ton/ha) y la fracción de biomasa quemada en el Pacífico (0,05). Dicha relación se realizó mediante la aplicación de la Ecuación A2.72, para obtener la cantidad de materia seca incinerada para el año 2010.

Ecuación A2.72

$$\text{Materia seca incinerada} = \alpha * \beta * A * B$$

Donde:

Materia seca incinerada= Cantidad neta de materia seca incinerada (ton)

α = Fracción de biomasa quemada en el Pacífico (0,05)

β = Biomasa aérea en los bosques tropicales (264,1 ton Materia Seca/ha)

A = Área total incinerada (ha)

B = Eficiencia de la combustión

Posteriormente, se calcularon las emisiones de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Para NO_x , CO, COVDM, SO_x y NH_3 :

Ecuación A2.73

$$E_{\text{pollutant}} = AR_{\text{area}} * EF_{\text{pollutant}}$$

Donde:

$E_{\text{pollutant}}$ = Cantidad de contaminante emitido (kg/año)

AR_{area} = Área quemada (ha)

$EF_{\text{pollutant}}$ = Factor de emisión del contaminante (kg/ha.año)

Para material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) y sólidos totales suspendidos:

Ecuación A2.74

$$E_{\text{pollutant}} = AR * EF_{\text{pollutant}} * 1000$$

Donde:

$E_{\text{pollutant}}$ = Cantidad de contaminante emitido (kg/año)

AR= Cantidad de materia seca quemada (kg)

$EF_{\text{pollutant}}$ = Factor de emisión del contaminante (g/kg materia seca quemada)

Módulo de residuos

Disposición en tierra de los residuos sólidos

Para esta categoría se determinaron las cantidades de COVDM generadas por la disposición en tierra de los residuos sólidos empleando la única metodología descrita en la guía EMEP (EEA, 2009). La información requerida para esta estimación parte de las emisiones de metano ya calculadas bajo la metodología IPCC (2006) e información dada por defecto de la guía EMEP. A continuación se describen en detalle los datos y las ecuaciones empleadas.

Cuadro A2.22. Datos de la actividad requeridos para el cálculo de las emisiones de COVDM procedentes de la disposición de residuos sólidos en tierra.

Variable	Valor
Total neto anual de emisiones de CH ₄ (GgCH ₄ . Año ⁻¹)	18,534
Total neto anual de emisiones de CH ₄ (MolCH ₄ . Año ⁻¹)	1.158.375.000
Total neto anual de emisiones de CH ₄ (m ³ CH ₄ . Año ⁻¹)	25.963.399
Porcentaje anual de emisiones de CH ₄ (%)	98,70
Porcentaje anual de emisiones de COVs (%)	1,30
Total neto anual de emisiones de COVs (m ³ COVs. Año ⁻¹)	341.969,8
Gas de relleno producido (m ³ /año)	26.305.368,9
Factor de emisión para COVDM (g/ m ³ de gas de relleno)	5,65

Mediante la ecuación A2.75 aplicación de los gases ideales, se obtuvo el total neto de las emisiones de CH₄ dadas en metros cúbicos, posteriormente se calculó las emisiones anuales de COVs empleando el resultado obtenido y los porcentajes de emisión de metano y COVs dados por la EEA (2009), para finalmente obtener el total de gas de relleno producido en el año 2010 (Ver Ecuación A2.76).

Ecuación A2.75

$$(Emisiones\ de\ CH_4 * R * t) / P$$

Donde:

Emisiones de CH₄ = Total neto de emisiones de CH₄ (mol CH₄/año)

$$R: Constante\ de\ los\ gases\ ideales \left(8,31434 \frac{pa.m^3}{mol. K} \right)$$

t= Temperatura (273,15 K)

P= Presión 101325 pascales

Ecuación A2.76

$$gas\ de\ relleno = \frac{Emisiones\ de\ CH_4 * \%anual\ de\ CH_4}{\%anual\ de\ COVs} + emisiones\ de\ CH_4$$

Donde:

Gas de relleno= Total neto de gas de relleno producido (m³/año)

Emisiones de CH₄= Total neto de emisiones de CH₄ (m³ CH₄/año)

% anual de CH₄= Porcentaje anual de emisiones de CH₄

% anual de COVs= Porcentaje anual de emisiones de COVs

Una vez estimado el valor del gas de relleno producido en el año de estudio, se calculó la emisión de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, de la siguiente manera:

Ecuación A2.77

$$\text{Emisión de COVDM} = \text{Factor de emisión para COVDM} * \text{Gas de Relleno}$$

Tratamiento de aguas residuales domésticas

EL tratamiento de las aguas residuales domésticas genera emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, razón por la cual en esta categoría se empleó la metodología de Nivel II para su estimación.

Partiendo de los resultados obtenidos de la carga contaminante de DBO_5 anuales identificados bajo la metodología IPCC (2006) para cada planta de

tratamiento de agua residual doméstica, los caudales y la concentración de estas se estimó la producción anual de aguas residuales en m^3 , utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación A2.78

$$Q = \frac{\text{Carga de DBO}_5}{\text{Concentración de DBO}_5} * 1000^{-1}$$

Donde:

Q= Caudal de aguas residuales ($\text{m}^3/\text{año}$)

Carga de DBO_5 = Carga de DBO_5 /($\text{mgDBO}_5/\text{año}$)

Concentración de DBO_5 = Concentración de DBO_5 ($\text{mg DBO}_5/\text{L}$)

Cuadro A2.23. Carga y concentración anual de DBO_5 y caudal para cada sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Carga de DBO_5	Carga de DBO_5 mg/año	Concentración de DBO_5 mg/L	Caudal l/año	Caudal de aguas residuales $\text{m}^3/\text{año}$
16.714,08	16.714.080.000	265	63.072.000	63.072
69.116,82	69.116.820.480	288	239.988.960	239.989
12.787,61	12.787.611.480	101,5	125.986.320	125.986
9.430,75	9.430.746.192	83,3	113.214.240	113.214
6.663,87	6.663.872.160	56,5	117.944.640	117.944
67.464,33	67.464.334.080	286	235.889.280	235.889
4.814,68	4.814.679.960	238	20.229.747	20.229
4.083,56	4.083.561.892	238	17.157.823	17.157
11.597.875,00	11.597.875.000.000	238	48.730.567.226	48.730.567
30.551.595,00	30.551.595.000.000	238	128.368.046.218	128.368.046

El Cuadro A2.23 describe en detalle los valores utilizados para dicho cálculo y los caudales finales obtenidos. Posteriormente se estimó las emisiones de COVDM utilizando la ecuación general y el factor de emisión dado por la EEA (2009), cuyo valor es de 15 $\text{mg COVDM}/\text{m}^3$ agua residual.

Ecuación A2.79

$$\text{Emisión de COVDM} = \text{Factor de emisión par COVDM} * Q(\text{m}^3 / \text{año})$$

Bibliografía

- Alcaldía de Santiago de Cali. 2006. Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios generados en el Municipio de Santiago de Cali. Departamento Administrativo de Planeación Municipal. Cali, Colombia
- Alcaldía de Santiago de Cali. 2014. Cali en cifras 2013. Departamento Administrativo de Planeación. Cali, Colombia. 216 p. Disponible en: <http://bit.ly/20RLEAk>
- Alzate A; Tobón O. 2004. Manual ambiental sectorial: Proyecto gestión ambiental en el sector de curtiembres. Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales. 59 p. Disponible en: <http://bit.ly/1p5HqHS>
- Baca B; Soto L; Pardo M. 2000. Fijación biológica de nitrógeno. Elementos 38(7):43–49. Disponible en: <http://bit.ly/1oWxnnU>
- Bohórquez A; Lugo D. 2010. Cuantificación y análisis de gases de efecto invernadero (GEI) en el ciclo de vida del etanol obtenido de la caña de azúcar, con base en las directrices del IPCC 2006. Caso de estudio: Ingenio Providencia S.A. Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. 201 p. Disponible en : <http://bit.ly/1QYwpV2>
- CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca); Univalle (Universidad del Valle). 2007. Modelación de escenarios para planes de control de contaminantes.
- DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente). 2006. Resolución No. 00374 de 2006. Disponible en: <http://bit.ly/1VY5EhC>
- DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente). 2012. Informe final: Fortalecimiento tecnológico de la red de monitoreo de calidad del aire y evaluación de la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago de Cali. K2 Consultoría, Alcaldía de Santiago de Cali.
- DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente); Universidad Autónoma de Occidente (UAO). 2013. Carbono neutro en la ciudad de Cali – Estimación de la huella de carbono y huella hídrica. Cali, Colombia.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2005. Censo general Valle del Cauca y Cali. Disponible en: <http://bit.ly/1Rtxi22>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2007. Encuesta anual Manufacturera. Disponible en: <http://bit.ly/25lBAwP>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2010. Censo general 2005 perfil Cali-Valle del Cauca. Boletín. Disponible en: <http://bit.ly/1Sc1SCL>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2011. Producto interno bruto – Cuarto trimestre de 2010, base 2005. Boletín de prensa No. 4. Disponible en: <http://bit.ly/1pCpzbF>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). s.f. Colombia: Proyecciones de población municipales por área. Disponible en: <http://bit.ly/1bZjWwA>
- Delgadillo O. 2014. La caña de azúcar en la historia ambiental del valle geográfico del río Cauca (1864–2010). Tesis de doctorado en estudios ambientales y rurales. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. 412 p. Disponible en: <http://bit.ly/1TVy6CR>

- Dow Corning. 2005. Información de producto. Hidrófugo Z-6689 de Dow Corning. Dow Corning Corporation, Estados Unidos. Disponible en: <http://bit.ly/1MRKNW>
- EEA (European Environment Agency). 2009. EMEP/EEA air pollution emission inventory guidebook 2009. Copenhagen, Dinamarca. Disponible en: <http://bit.ly/1VX6yLk>
- EMSIRVA (Empresa de Servicio Público de Aseo de Cali). 2007. Estudios socioeconómicos de la cadena productiva del reciclaje en Cali. Cali, Colombia.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. FAOSTAT Domains: Average protein supply (g/capita/day) (3-year average). Disponible en: <http://bit.ly/1X1fnDT>
- Ferro A. 2012. Evaluación de sostenibilidad del sistema de tratamiento de aguas residuales del corregimiento de Felidia zona rural del municipio de Santiago de Cali. Universidad del Valle, Cali, Colombia. 93 p. Disponible en: <http://bit.ly/1L7JIQA>
- Fundación Biodiversidad; Oficina Española de Cambio Climático; Agencia Estatal de Meteorología; Centro Nacional de Educación Ambiental. 2013. Cambio Climático: Bases físicas. Guía resumida del Quinto Informe del IPCC. Disponible en: <http://bit.ly/1mc8yhK>
- Garizado P; Fernández E; Duque H. 2014. Medición del Producto Interno Bruto para los municipios del Valle Del Cauca: Estimación y Análisis. Universidad Autónoma de Occidente. Disponible en: <http://bit.ly/1OVyqcT>
- Gobernación del Valle. 2010. Información estadística: Evaluaciones agrícolas (EVAS) 2000–2013. Secretaría de Medio Ambiente, Seguridad Alimentaria y Pesca. Cali, Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/1RMSaUy>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) 2012a. Metodología para la estimación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de actividades agropecuarias. Bogotá, Colombia.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2012b. Metodología para la estimación de gases de efecto invernadero de actividades pecuarias. Bogotá, Colombia.
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; Cancillería. 2015. Inventario nacional de gases de efecto invernadero (GEI) de Colombia. IDEM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo); MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible); DNP (Departamento Nacional de Planeación); Cancillería; FMAM (Fondo para el Medio Ambiente Mundial). Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/1RIh8fa>
- IFA (Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes); FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Los fertilizantes y su uso. Roma, Italia. Disponible en: <http://bit.ly/1nwenHG>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi); CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). 2004. Levantamiento de suelos y zonificación de Tierras del Departamento del Valle del Cauca, Tomo I. Bogotá, Colombia.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2008a. Geopedología. Disponible en: <http://bit.ly/1nYI09N>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2008b. Zonificación climática. Disponible en: <http://bit.ly/1nYI09N>

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2003. Orientación sobre las buenas prácticas en el sector CUTS. En: Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (GPG-LULUCF, por sus siglas en inglés). IPCC, Suiza. Disponible en: <http://bit.ly/1RMUAm7>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Disponible en: <http://bit.ly/1qwJL4g>
- León Aristizábal G. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. IDEAM. Bogotá, Colombia.
- Macedo I; Leal M; Azevedo J. 2004. Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. Government of the State of São Paulo-Secretariat of the Environment. Brasil. Disponible en: <http://bit.ly/1L7O7Dc>
- MADT; IDEAM; PNÜD; GEF. 2008. Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático: Inventario de gases de efecto invernadero – años 2000 y 2004. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MADT), Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Colombia (PNÜD) y Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF). Millán L. 2010. Protocolo de restauración ecológica para el manejo de incendios forestales de los ecosistemas propios de las zonas de vida predominantes en la cuenca media-alta de los ríos Meléndez, Lili y Cañaveralejo, y de los cerros tutelares de Cali, de acuerdo con el uso potencial del suelo en el marco del POMCH y el POT. DAGMA, Cali, Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/1p66gH>
- Murgueitio E; Calle Z. 1999. Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. En: Sánchez MD; Rosales M. Agroforestería para la producción animal en América Latina. FAO, Roma, Italia. Disponible en: <http://bit.ly/1TxuV4P>
- Olarte C; Cardona M; Rodríguez J; Padilla L. 2004. Módulo de uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura. En: Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural (MADR) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, Colombia. p. 227–290. Disponible en: <http://bit.ly/21cQbeW>
- Patiño PE. 2014. Biomasa residual vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia 2(1):45–52. Disponible en: <http://bit.ly/21OWlnw>
- Pedraza A; Saldarriaga G. 2009. Módulo de residuos. En: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero. Bogotá, Colombia. p. 293–320. Disponible en: <http://bit.ly/1PuSPpp>
- Pulido A. 2012. Inventario de gases de efecto invernadero para Cundinamarca y Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 107 p. Disponible en: <http://bit.ly/1YdCbSc>
- Quintana O; Jiménez R; Bedoya O. 2004. Porquinaza en la alimentación animal. Revista Lasallista de Investigación 1(1):72–76. Disponible en: <http://bit.ly/1OVFqGE>
- SAC (Sociedad de Agricultores de Colombia). 2002. Guía ambiental para el subsector porcícola. 102 p. Disponible en: <http://bit.ly/1uVbXIO>

- Seinfeld JH; Pandis SN. 2006. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change 2.a. John Wiley & Sons Inc. 1203 p.
- Smith K; Conen F. 2004. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. Soil Use and Management 20(2):255–263. Disponible en: <http://bit.ly/1U1cOIY>
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). 2010. Producción oficial de minerales en Colombia. Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). Disponible en: <http://bit.ly/1UDR3dt>
- Yepes A; Navarrete D; Phillips J; Duque A; Cabrera E; Galindo G. 2011. Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el período 2005–2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, Colombia. 32 p.

Diagramación	Laura Duque
Edición de producción	Claudia Marcela Calderón
Fotografías portada	CIAT Flickr, El Pais (http://bit.ly/1Wf25pp), http://goo.gl/zMh1nm y http://bit.ly/1SUGdge
Impresión	Velásquez Digital S.A.S, Cali Colombia

Diciembre 2015



Informes

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca

www.cvc.gov.co

Teléfono: (57 2) 6206600 Ext. 1332 y 1325